



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

**ANALISIS STABILITAS TRANSIEN DENGAN
MEMPERTIMBANGKAN BEBAN DINAMIS
MENGUNAKAN METODE *TIME DOMAIN
SIMULATION***

Ahmad Subhan
NRP 2210100090

Dosen Pembimbing
Dr.Eng. Ardyono Priyadi, S.T.,M.Eng.
Ir. Arif Musthofa, M.T.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

**ANALYSIS OF TRANSIENT STABILITY TO
CONSIDER DYNAMIC LOAD USET TIME
DOMAIN SIMULATION METHOD**

Ahmad Subhan
NRP 2210100090

Dosen Pembimbing
Dr.Eng. Ardyono Priyadi, S.T.,M.Eng.
Ir. Arif Musthofa, M.T.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015

**ANALISIS STABILITAS TRANSIEN DENGAN
MEMPERTIMBANGKAN BEBAN DINAMIS MENGGUNAKAN
METODE TIME DOMAIN SIMULATION**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik**

Pada

Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga

Jurusan Teknik Elektro

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

Dr.Eng. Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng
NIP. 197309271998031004

Dosen Pembimbing II

Ir. Arif Musthofa, M.T.
NIP. 196608111992031004



Analisis Stabilitas Transien dengan Mempertimbangkan Beban Dinamis Menggunakan Metode *Time Domain Simulation*

Nama : Ahmad Subhan
Pembimbing I : Dr.Eng. Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng
Pembimbing II: Ir. Arif Musthofa, M.T.

ABSTRAK

Analisis mengenai kestabilan transien sistem tenaga memegang peranan penting dalam operasi sistem tenaga listrik. Karena sebuah sistem tenaga listrik dapat dikatakan handal apabila sistem tersebut mampu melayani kebutuhan beban secara kontinyu. Pada sistem selalu terjadi perubahan beban, sehingga dapat mengakibatkan gangguan atau ketidakstabilan pada sistem tenaga listrik. Bila gangguan tersebut tidak segera diatasi, maka akan menyebabkan ketidakseimbangan sistem, salah satunya adalah putaran rotor pada generator yang mengalami percepatan atau perlambatan sehingga terjadi hilangnya sinkronisasi pada generator. Untuk mencapai kestabilan setelah adanya gangguan, dibutuhkan suatu analisa kondisi transien untuk menentukan *Critical Clearing Time (CCT)*. Metode yang dipakai adalah metode *Time Domain Simulation* sebagai pedomannya adalah perubahan dari sudut rotor generator sewaktu terjadi gangguan dalam sistem. Selain itu diamati juga mengenai adanya pengaruh *damping* dalam kestabilan sistem. Hasil dari simulasi ini menunjukkan bahwa adanya *damping* didalam sistem menyebabkan lebih stabil, sehingga nilai CCT antara sistem yang ber-*damping* dengan sistem yang tidak menggunakan *damping* memiliki nilai *Critical Clearing Time (CCT)* yang lebih besar pada sistem yang menggunakan *damping*.

Kata Kunci : Kestabilan transien, *Critical Clearing Time (CCT)*, *Time Domain Simulation*, *Damping*

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

Analysis of Transient Stability to Consider Dynamic Load Use Time Domain Simulation Method

Name : Ahmad Subhan
Advisor I : Dr.Eng. Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng
Advisor II : Ir. Arif Musthofa, M.T.

ABSTRACT

Analysis of transient stability of power systems hold a very important in the operation of electric power system. Because a power system can be said to be reliable if the the system is able to serve of the continuous load. In the system is always happen to change of the load, so can make instability of the power system. If the problem doesn't secure, it will lead to an imbalance of the system, one of which is the rotation of the rotor of the generator is experiencing acceleration or deceleration resulting in a loss of synchronization of the generator. To achieve stability after a disturbance, it takes a transient condition analysis to determine Critical Clearing Time (CCT). The method used is the method of Time Domain Simulation with the guidelines is the change of the generator angel during a disturbance in the system. But it was observed also on the influence of damping in the stability of the system. The result of these simulations indicate that the presence of damping in the system load to a more stable system, so that the CCT values between the system side by side with a damping system that doesn't use the CCT has greater value on a system with damping.

Kata Kunci : *Critical Clearing Time (CCT), Damping, Time Domain Simulation, The stability of the system.*

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas segala rahmat dan karuniaNya yang berlimpah, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul : **Analisis Stabilitas Transien Mempertimbangkan Beban Dinamis dengan Menggunakan Metode *Time Domain Simulation*** tepat pada waktunya. Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan studi pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Atas selesainya penyusunan tugas akhir ini, saya sebagai penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. ALLAH SWT atas segala rahmat dan nikmat yang tidak terhitung.
2. Segenap keluarga, terutama kedua orang tua saya dan kakak – kakak saya yang selalu memberikan motivasi, semangat, dukungan dan doa kepada penulis.
3. Bapak Dr.Eng. Ardyono Priyadi ST, M.Eng. dan Arif Mustofa, ST., MT.sebagai Dosen Pembimbing Penulis yang telah membimbing,memberikan pengetahuan, arahan, dan bantuan dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
4. Teman – teman kontrakan gang 2 no 36 yang telah memberikan keceriaan dan bantuan hingga tugas akhir ini selesai.
5. Keluarga E-50 atas dukungan dan semangat yang tiada henti kepada penulis.
6. Teman-teman asisten lab lipist 204 telah membantu penulis
7. Semua pihak yang telah membantu dalam pelaksanaan dan penyusunan laporan tugas akhir yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu hingga tugas akhir ini dapat terselesaikan

Besar harapan penulis agar tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dan masukan bagi pembaca. Oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun untuk pengembangan ke arah yang lebih baik. Penulis juga memohon maaf jika ada kekurangan pada Tugas Akhir ini. Semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat dalam pengembangan keilmuan di kemudian hari.

Surabaya, Juli 2015

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL.....	
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	
LEMBAR PENGESAHAN.....	
ABSTRAK	i
<i>ABSTRACT</i>	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL.....	xvii
BAB 1	
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan	2
1.5 Metodologi	3
1.6 Sistematika	4
1.7 Relevansi	4
BAB 2	
KESTABILAN TRANSIEN	7
2.1 Kestabilan pada Sistem Tenaga Listrik.....	7
2.2 Kestabilan Transien	8
2.2.1. Kestabilan Sudut Rotor.....	9
2.2.2. Kestabilan Frekuensi	10
2.2.3. Kestabilan Tegangan	10
2.3 Persamaan Ayunan	12
2.4 <i>Critical Clearing Time</i>	15
2.5 Damping.....	16
2.6 Gangguan yang Mempengaruhi Kestabilan	17
2.6.1. Hubung Singkat.....	17
2.6.2. Motor Starting	17

2.6.3. Load Shedding.....	18
BAB 3	
PEMODELAN SISTEM	19
3.1 Power Flow.....	19
3.2 Reduksi Matrik.....	24
3.3 Pemodelan Sistem.....	25
3.4 Swing Equation.....	27
3.5 Metode Runge Kutta.....	29
BAB 4	
ANALISA DAN SIMULASI	31
4.1 Data Sistem 3 Generator - 9 Bus dan 4 Generator 9 Bus..	31
4.2 Penentuan Parameter Awal.....	34
4.3 Analisa Perhitungan <i>Critical Clearing Time</i> (CCT) Untuk Setiap Gangguan pada Sistem 3 Generator 9 Bus dan 4 Generator – 9 Bus	37
BAB 5	
PENUTUP	85
5.1 Kesimpulan.....	85
5.2 Saran.....	85
DAFTAR PUSTAKA.....	87
RIWAYAT HIDUP	89

DAFTAR TABEL

Tabel		Halaman
Tabel 4.1	Data Transmisi Sistem 3 Generator - 9 Bus (Statik).....	33
Tabel 4.2	Data Bus Sistem 3 Generator - 9 Bus (Statik).....	33
Tabel 4.3	Data Transmisi Sistem 4 Generator - 9 Bus (Motor).....	34
Tabel 4.4	Data Bus Sistem 3 Generator - 9 Bus (Statik).....	34
Tabel 4.5	Parameter yang Didapatkan dari Aliran Daya Sistem 3 Generator – 9 Bus (statik).....	35
Tabel 4.6	Parameter yang Didapatkan dari Aliran Daya Sistem 4 Generator – 9 Bus (motor).....	35
Tabel 4.7	Daya Listrik 3 Generator - 9 Bus tanpa <i>Damping</i> (statik).....	36
Tabel 4.8	Daya Listrik 3 Generator - 9 Bus dengan <i>Damping</i> (statik).....	36
Tabel 4.9	Daya Listrik 4 Generator - 9 Bus tanpa <i>Damping</i> (motor).....	36
Tabel 4.10	Daya Listrik 4 Generator - 9 Bus dengan <i>Damping</i> (motor).....	37
Tabel 4.11	Hasil perhitungan CCT tanpa menggunakan <i>Damping</i>	74
Tabel 4.12	Hasil perhitungan CCT dengan menggunakan <i>Damping</i>	83

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
Gambar 2.1. Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga.....	9
Gambar 2.2. Respon Sudut Rotor Terhadap Gangguan Transien.....	11
Gambar 2.3. Ilustrasi Arah Perputaran Rotor, Torsi Elektris dan Torsi Mekanik. (a) pada Generator; (b) pada Motor.....	12
Gambar 2.4. Damper Winding.....	16
Gambar 3.1. Ilustrasi Metode Newton Raphson.....	20
Gambar 3.2. Pemodelan Generator.....	25
Gambar 4.1. <i>Single Line Diagram</i> Sistem 3 Generator - 9 Bus.....	31
Gambar 4.2. <i>Single Line Diagram</i> Sistem 4 Generator - 9 Bus.....	32
Gambar 4.3. Grafik kaarakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan A pada sistem 3 generator-9 bus tanpa menggunakan <i>damping</i>	38
Gambar 4.4. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan A pada sistem 3 generator-9 bus tanpa <i>damping</i>	39
Gambar 4.5. Grafik kaarakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan B pada sistem 3 generator-9 bus tanpa menggunakan <i>damping</i>	40
Gambar 4.6. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan B pada sistem 3 generator-9 bus tanpa <i>damping</i>	41
Gambar 4.7. Grafik kaarakteristik kecepatan sudut (ω)	

	dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan C pada sistem 3 generator-9 bus tanpa menggunakan <i>damping</i>	42
Gambar 4.8.	(a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan C pada sistem 3 generator-9 bus tanpa <i>damping</i>	43
Gambar 4.9.	Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan D pada sistem 3 generator-9 bus tanpa menggunakan <i>damping</i>	44
Gambar 4.10.	(a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan D pada sistem 3 generator-9 bus tanpa <i>damping</i>	45
Gambar 4.11.	Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan E pada sistem 3 generator-9 bus tanpa menggunakan <i>damping</i>	46
Gambar 4.12.	(a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan E pada sistem 3 generator-9 bus tanpa <i>damping</i>	47
Gambar 4.13.	Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan F pada sistem 3 generator-9 bus tanpa menggunakan <i>damping</i>	48
Gambar 4.14.	(a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s)	

	di titik gangguan F pada sistem 3 generator-9 bus tanpa <i>damping</i>	49
Gambar 4.15.	Grafik kaarakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan G pada sistem 3 generator-9 bus tanpa menggunakan <i>damping</i>	50
Gambar 4.16.	(a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan G pada sistem 3 generator-9 bus tanpa <i>damping</i>	51
Gambar 4.17.	Grafik kaarakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan H pada sistem 3 generator-9 bus tanpa menggunakan <i>damping</i>	52
Gambar 4.18.	(a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan H pada sistem 3 generator-9 bus tanpa <i>damping</i>	53
Gambar 4.19.	Grafik kaarakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan I pada sistem 3 generator-9 bus tanpa menggunakan <i>damping</i>	54
Gambar 4.20.	(a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan I pada sistem 3 generator-9 bus tanpa <i>damping</i>	55
Gambar 4.21.	Grafik kaarakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan A pada sistem 4 generator-9 bus tanpa menggunakan <i>damping</i>	56

Gambar 4.22. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan A pada sistem 4 generator-9 bus tanpa <i>damping</i>	57
Gambar 4.23. Grafik kaarakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan B pada sistem 4 generator-9 bus tanpa menggunakan <i>damping</i>	58
Gambar 4.24. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan B pada sistem 4 generator-9 bus tanpa <i>damping</i>	59
Gambar 4.25. Grafik kaarakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan C pada sistem 4 generator-9 bus tanpa menggunakan <i>damping</i>	60
Gambar 4.26. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan C pada sistem 4 generator-9 bus tanpa <i>damping</i>	61
Gambar 4.27. Grafik kaarakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan D pada sistem 4 generator-9 bus tanpa menggunakan <i>damping</i>	62
Gambar 4.28. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan D pada sistem 4 generator-9 bus tanpa <i>damping</i>	63
Gambar 4.29. Grafik kaarakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam	

	rad di titik gangguan E pada sistem 4 generator-9 bus tanpa menggunakan <i>damping</i>	64
Gambar 4.30.	(a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan E pada sistem 4 generator-9 bus tanpa <i>damping</i>	65
Gambar 4.31.	Grafik kaarakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan F pada sistem 4 generator-9 bus tanpa menggunakan <i>damping</i>	66
Gambar 4.32.	(a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan F pada sistem 4 generator-9 bus tanpa <i>damping</i>	67
Gambar 4.33.	Grafik kaarakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan G pada sistem 4 generator-9 bus tanpa menggunakan <i>damping</i>	68
Gambar 4.34.	(a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan G pada sistem 4 generator-9 bus tanpa <i>damping</i>	69
Gambar 4.35.	Grafik kaarakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan H pada sistem 4 generator-9 bus tanpa menggunakan <i>damping</i>	70
Gambar 4.36.	(a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan H pada sistem 4 generator-9	

	bus tanpa <i>damping</i>	71
Gambar 4.37.	Grafik kaarakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan I pada sistem 4 generator-9 bus tanpa menggunakan <i>damping</i>	72
Gambar 4.38.	(a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan I pada sistem 4 generator-9 bus tanpa <i>damping</i>	73
Gambar 4.39.	Grafik kaarakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan A pada sistem 4 generator-9 bus tanpa menggunakan <i>damping</i>	75
Gambar 4.40.	(a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan A pada sistem 4 generator-9 bus tanpa <i>damping</i>	76
Gambar 4.41.	Grafik kaarakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan H pada sistem 4 generator-9 bus tanpa menggunakan <i>damping</i>	77
Gambar 4.42.	(a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan H pada sistem 4 generator-9 bus tanpa <i>damping</i>	78
Gambar 4.43.	Grafik kaarakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan A pada sistem 4 generator-9 bus tanpa menggunakan <i>damping</i>	79
Gambar 4.44.	(a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ	

	(rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan A pada sistem 4 generator-9 bus tanpa <i>damping</i>	80
Gambar 4.45.	Grafik kaarakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan H pada sistem 4 generator-9 bus tanpa menggunakan <i>damping</i>	81
Gambar 4.46.	(a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan H pada sistem 4 generator-9 bus tanpa <i>damping</i>	82

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Ukuran dan kompleksitas dari sistem tenaga listrik yang modern mengharuskan adanya pengembangan dari teknik analisis guna tetap terjaganya kestabilan sistem tenaga listrik tersebut. Kestabilan sistem tenaga listrik dapat didefinisikan sebagai kemampuan dari sistem tenaga listrik tersebut untuk memperoleh keadaan kesetimbangan setelah sistem tenaga listrik mengalami kesalahan fisik, sehingga praktis seluruh sistem tetap utuh.

Kestabilan sistem tenaga listrik dapat diklasifikasikan menjadi tiga, yaitu kestabilan sudut rotor, kestabilan frekuensi dan kestabilan tegangan. Salah satu kestabilan yang perlu dijaga yaitu kestabilan sudut rotor. Dimana kestabilan sudut rotor terbagi menjadi dua yaitu *small disturbance angle stability* dan *transient stability*. Kestabilan sudut rotor mengacu pada kemampuan mesin sinkron pada sistem tenaga interkoneksi untuk mempertahankan kesinkronan setelah mendapatkan gangguan. Ketika gangguan yang terjadi cukup besar inilah yang disebut dengan kestabilan transien. Kestabilan transien tergantung pada kondisi awal dan besarnya gangguan. Hal ini berkaitan pada kemampuan keseimbangan antara torsi elektrik dan torsi mekanik pada setiap mesin sinkron yang ada pada sistem tenaga listrik tersebut.

Pada kondisi *under steady-state* terdapat kesetimbangan antara torsi mekanik masukan dan torsi elektrik keluaran dari setiap generator, dan pada kecepatan yang konstan. Jika kesetimbangan terganggu terjadi perbedaan besar torsi mekanik masukan dan torsi elektrik keluaran, sehingga mengakibatkan percepatan atau perlambatan putaran rotor generator. Jika gangguan tidak dihilangkan segera maka percepatan atau perlambatan putaran rotor generator akan mengakibatkan hilangnya sinkronisasi dalam sistem tenaga listrik tersebut.

Guna memperoleh kestabilan sudut rotor sistem ketika gangguan besar terjadi perlu adanya sebuah perkiraan yang dapat menentukan *Critical Clearing Time (CCT)* atau waktu pemutus kritis agar pengaman

dapat bekerja dalam waktu yang relatif aman sehingga sistem masih dalam keadaan stabil.

Sebuah pendekatan alternatif untuk menganalisis kestabilan transien dapat menggunakan metode tidak langsung. Metode tidak langsung adalah metode yang tidak dapat menghitung *Critical Clearing Time (CCT)* secara langsung. Metode ini dinamakan *Time Domain Simulation*. Walaupun tidak dapat menghitung *Critical Clearing Time (CCT)* secara langsung, metode ini dapat menemukan *Critical Clearing Time (CCT)* secara eksak dan akurat. Hal ini disebabkan penyelesaian persamaan diferensial secara integralistik.

Dalam tugas akhir ini *Time Domain Simulation* digunakan untuk menghitung *Critical Clearing Time (CCT)* dengan mempertimbangkan beban dinamis berupa motor. Simulasi perhitungan *Critical Clearing Time (CCT)* menggunakan sistem 3 generator 9 bus.

1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan utama dalam tugas akhir ini adalah mendapat nilai *critical clearing time (CCT)* dengan mempertimbangkan beban dinamis pada sistem multi mesin khususnya pada sistem 3 generator 9 bus menggunakan metode *Time Domain Simulation*.

1.3 Batasan Masalah

Agar tugas akhir ini tidak menyimpang, maka diambil batasan dan asumsi sebagai berikut:

1. *Software* yang digunakan untuk melakukan perhitungan dan simulasi adalah MATLAB 7.10.0 (R2010a)
2. Perhitungan CCT menggunakan *Time Diomain Simulation Method*

1.4 Tujuan

Tujuan dari tugas akhir ini adalah untu menentukan *critical clearing time (CCT)* dari multi mesin menggunakan metode *time domain simulation*. Sehingga hasil yang didapat mampu memberikan suatu gambaran terhadap kestabilan transien suatu sistem.

1.5 Metodologi

Metode penelitian yang digunakan pada tugas akhir ini sebagai berikut :

a. Studi Literatur

Penulis mempelajari tentang transien stability pada multimesin, meliputi: *time domain simulation*, generator kritis, serta perhitungan CCT pada multimesin dari jurnal IEEE, beberapa buku referensi tentang *transient stability* dll.

b. Pemodelan

Setelah dilakukan studi literatur, penulis melakukan pemodelan awal tentang rancangan awal metode untuk menghitung CCT pada multimesin. Dari pemodelan ini akan didapat alur untuk menghitung CCT pada multimesin

c. Perancangan Algoritma Program dan Simulasi

Setelah mendapat literatur yang menunjang, penulis akan memodelkannya dalam bentuk simulasi menggunakan *software* MATLAB 7.10.0 (R2010a).

d. Analisis Data

Hasil simulasi kemudian dianalisa untuk mendapatkan suatu kesimpulan. Data yang akan dianalisis adalah hasil perhitungan parameter-parameter kecepatan sudut, sudut rotor yang disimulasikan dengan metode *Time Domain Simulation* sehingga didapatkan CCT

e. Penyusunan Buku Tugas Akhir

Tahap ini merupakan bagian terakhir dari serangkain kegiatan tugas akhir. Penyusunan buku tugas akhir ini berupa laporan ilmiah yang mencakup semua proses pengerjaan tugas akhir, mulai dari dasar teori yang dipelajari, teori yang digunakan, hingga kesimpulan dan saran yang dihasilkan dari penelitian.

1.6 Sistematika

Sistematika penulisan tugas akhir ini terbagi atas lima bagian atau bab, dan masing-masing bab akan didefinisikan secara singkat sebagai berikut:

- BAB 1 : Pendahuluan
Bab ini membahas tentang penjelasan mengenai latar belakang, permasalahan, tujuan, metodologi dan sistematika penulisan
- BAB 2 : Kestabilan Transien
Bab ini membahas tentang teori-teori mengenai pemodelan sistem, analisis aliran daya dan mengenai CCT beserta hubungannya dengan kestabilan sistem tenaga
- BAB 3 : Pemodelan Sistem
Pada bab ini dibahas mengenai pemodelan sistem, dan persamaan-persamaan yang digunakan dalam pemodelan sistem.
- BAB 4 : Simulasi dan Analisis
Bab ini membahas tentang hasil simulasi, analisis dari hasil simulasi. Data yang akan dianalisis adalah parameter-parameter CCT pada analisis kestabilan transien, sehingga didapatkan permodelan yang paling baik.
- BAB 5 : Penutup
Kesimpulan tersebut merupakan jawaban dari permasalahan yang dianalisis. Selain itu, juga akan diberikan saran sebagai masukan berkaitan dengan apa yang telah dilakukan.

1.7 Relevansi

Hasil yang diperoleh dari tugas akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut :

1. Dapat menjadi referensi menentukan seberapa besar waktu krisis sistem yang diperbolehkan atau CCT yang dibutuhkan suatu sistem tenaga listrik pada keadaan transien.
2. Dapat menjadi referensi bagi mahasiswa lain yang hendak mengambil masalah yang serupa untuk tugas akhirnya.

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

BAB 2

KESTABILAN TRANSIEN

2.1 Kestabilan Sistem Tenaga Listrik

Salah satu ukuran kestabilan operasi sistem tenaga listrik adalah keseimbangan daya antara kebutuhan beban dengan pembangkitan generator. Dalam pengoperasian sistem tenaga listrik pada setiap saat akan selalu terjadi perubahan kapasitas dan letak beban dalam sistem. Perubahan tersebut mengharuskan setiap pembangkit menyesuaikan daya keluarannya melalui kendali governor maupun eksitasi mengikuti perubahan beban sistem. Jika hal ini tidak dilakukan maka akan menyebabkan keseimbangan daya dalam sistem terganggu dan efisiensi pengoperasian sistem menurun menyebabkan kinerja sistem memburuk. Kecepatan pembangkit memberi reaksi terhadap perubahan yang terjadi dalam sistem menjadi faktor penentu kestabilan sistem. Kestabilan mesin pembangkit sangat tergantung pada kemampuan sistem kendalinya. Sistem kendali yang andal jika mampu mengendalikan mesin tetap beroperasi normal mengikuti perubahan-perubahan yang terjadi dalam sistem. Jika semua mesin tetap beroperasi dalam kondisi normal meskipun ada gangguan, maka sistem tersebut akan benar-benar stabil.

Kestabilan didefinisikan sebagai kemampuan suatu sistem tenaga listrik untuk kembali pada kondisi awal dan memperoleh kembali kesetimbangan setelah terjadi gangguan dengan banyak variable yang dibatasi sehingga sistem tetap utuh [1]. Namun, sistem tenaga adalah sistem yang tidak linier karena beroperasi pada lingkungan yang terus berubah, misalnya akibat perubahan beban, perubahan output generator, dan hal lain yang berubah secara terus-menerus. Oleh karena itu, sistem tenaga harus kembali pada kondisi awal (steady state) meskipun mengalami osilasi akibat perubahan lingkungan sistem.

Respon dari sistem tenaga listrik sangat terkait dengan banyak komponen peralatan yang digunakan. Gangguan yang terjadi pada sistem tenaga listrik akan menyebabkan terjadinya pengisolasian pada sistem tenaga listrik, sehingga akan terjadi perbedaan arus, perbedaan

tegangan pada setiap bus jaringan, dan perbedaan kecepatan pada rotor generator yang ada. Perbedaan tegangan pada pembangkit dan saluran pada jaringan akan mempengaruhi regulator tegangan. Sedangkan perbedaan kecepatan rotor generator akan mempengaruhi kerja dari governor. Begitu pula dengan perubahan frekuensi pada sistem akan berpengaruh pada beban, sesuai dengan karakteristik beban tersebut.

Sistem tenaga listrik secara umum terdiri dari unit-unit pembangkit yang terhubung dengan saluran untuk melayani beban. Sistem tenaga listrik yang memiliki banyak mesin biasanya menyalurkan daya ke beban melalui saluran interkoneksi. Tujuan utama dari sistem saluran interkoneksi adalah untuk menjaga kontinuitas dan ketersediaan tenaga listrik terhadap kebutuhan beban yang terus meningkat. Semakin berkembang sistem tenaga listrik dapat mengakibatkan lemahnya performansi sistem ketika mengalami gangguan. Salah satu akibat dari gangguan tersebut dapat menyebabkan adanya ketidakseimbangan pada sistem tenaga listrik generator yang harus menyuplai kebutuhan beban secara tiba-tiba dan sebagainya yang jika tidak diredam dengan baik maka sistem akan terganggu dan dapat keluar dari area kestabilannya sehingga mengakibatkan pengaruh yang lebih buruk seperti pemadaman total (black out).

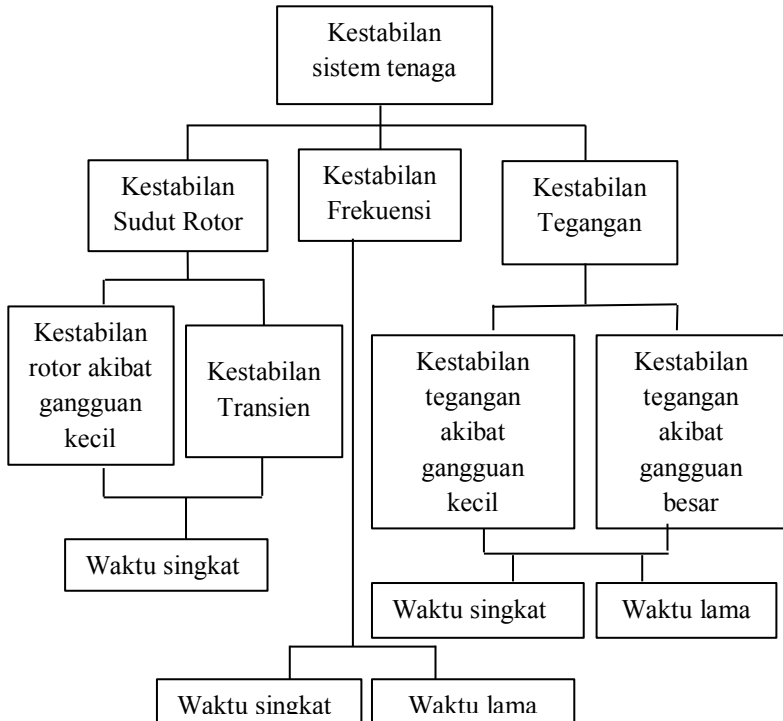
2.2 Kestabilan Transien

Kestabilan transien adalah kemampuan dari sistem tenaga listrik mempertahankan sinkronisasinya setelah mengalami gangguan besar yang bersifat mendadak selama sekitar satu *swing* pertama dengan asumsi bahwa pengatur tegangan otomatis atau AVR dan Governor belum bekerja.

Kestabilan sistem tenaga listrik dapat dipengaruhi banyak faktor. Sistem tenaga listrik mungkin bisa stabil pada gangguan yang besar namun sebaliknya, sistem mungkin tidak stabil pada gangguan yang lain. Oleh karena itu, untuk mempermudah dalam menganalisa kestabilan, perlu sebuah pengklasifikasian kestabilan sistem tenaga listrik. Berdasarkan referensi [1] kestabilan sistem tenaga listrik dikategorikan menjadi 3, yaitu:

1. Kestabilan sudut rotor
2. Kestabilan frekuensi
3. Kestabilan tegangan

Oleh karena itu pada gambar 2.1 ditunjukkan pengklasifikasian kestabilan sistem tenaga listrik untuk mempermudah dalam menganalisa kestabilan.



Gambar 2.1 Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga.

2.2.1 Kestabilan Sudut Rotor [1]

Kestabilan sudut rotor adalah kemampuan dari generator sinkron yang saling terinterkoneksi pada sistem tenaga listrik untuk mempertahankan sinkronisasinya setelah terjadi gangguan. Dalam hal

ini tergantung kemampuan mempertahankan keseimbangan antar torsi mekanik dan torsi listrik pada generator tersebut.

Kestabilan sudut rotor dibagi menjadi 2 kategori, yaitu [1]:

1. Kestabilan sudut rotor akibat gangguan kecil yaitu kestabilan sudut rotor akibat gangguan kecil berkaitan dengan kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan sinkronisasinya akibat gangguan kecil seperti perubahan beban. Studi kestabilan ini mempunyai kurun waktu 10-20 detik setelah gangguan
2. kestabilan transien atau kestabilan sudut rotor gangguan besar yaitu kestabilan transien berkaitan dengan kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan sinkronisasi ketika mengalami gangguan besar, seperti hubung singkat pada saluran transmisi. Respon sistem yang dihasilkan melibatkan besarnya penyimpangan dari sudut rotor generator dan dipengaruhi oleh ketidaklinieran hubungan sudut daya. Studi stabilitas transien memiliki kurun waktu 3-5 detik setelah gangguan. Untuk sistem yang sangat besar dengan ayunan antar wilayah yang dominan maka kurun waktu dapat diperpanjang menjadi 10-20 detik.

Kestabilan sudut rotor kecil dan kestabilan transien dikategorikan sebagai fenomena jangka pendek.

2.2.2 Kestabilan Frekuensi [1]

Kestabilan frekuensi mengacu pada kemampuan dari sistem tenaga untuk menjaga frekuensi agar tetap stabil setelah mengalami gangguan yang dapat mengakibatkan ketidakseimbangan yang signifikan antara pembangkitan dan beban. Hal ini tergantung pada kemampuan untuk menjaga keseimbangan antara pembangkitan dan beban. Masalah kestabilan frekuensi berhubungan dengan ketidakmampuan respon peralatan, koordinasi peralatan kontrol dan proteksi yang lemah atau cadangan daya generator yang tidak mencukupi. Kestabilan frekuensi dapat menjadi fenomena jangka pendek atau fenomena jangka panjang.

2.2.3 Kestabilan Tegangan [1]

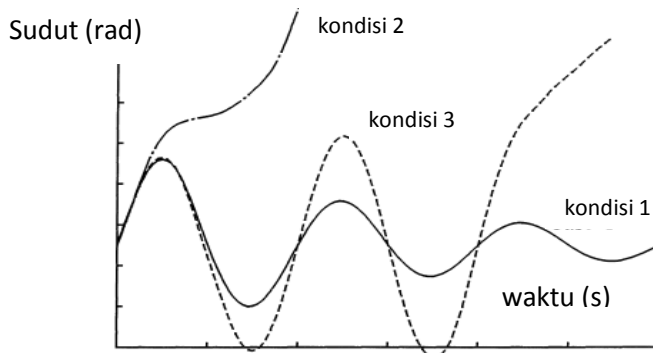
Kestabilan ini mengacu pada kemampuan sistem tenaga listrik untuk menyeimbangkan tegangan pada seluruh bus didalam sistem

sesaat setelah terjadi gangguan. Hal ini tergantung pada kemampuan untuk mempertahankan keseimbangan antara *supply* daya dan kebutuhan daya beban. Ketidakstabilan yang terjadi bisa dalam bentuk penurunan atau meningkatnya tegangan pada beberapa bus. Akibat yang mungkin terjadi karena ketidakstabilan tegangan adalah kehilangan beban pada suatu area atau putusnya jaringan transmisi oleh relay proteksi. Faktor utama yang berkontribusi ketidakstabilan tegangan adalah ketika gangguan yang terjadi menyebabkan kebutuhan daya reaktif meningkat diluar dari kapasitas daya reaktif yang tersedia oleh pembangkit.

Kestabilan tegangan diklasifikasikan menjadi 2 yaitu [1]:

1. Kestabilan tegangan akibat gangguan besar adalah kemampuan dari sistem untuk menjaga tegangan *steady* setelah mengalami gangguan besar seperti hilangnya pembangkitan. Studi stabilitas tegangan diperpanjang dari beberapa detik hingga puluhan menit
2. Kestabilan tegangan akibat gangguan kecil adalah kemampuan sistem tenaga untuk menjaga tegangan *steady* ketika mengalami gangguan kecil seperti kenaikan kebutuhan daya pada beban.

Kestabilan tegangan dapat menjadi fenomena jangka pendek atau fenomena jangka panjang.



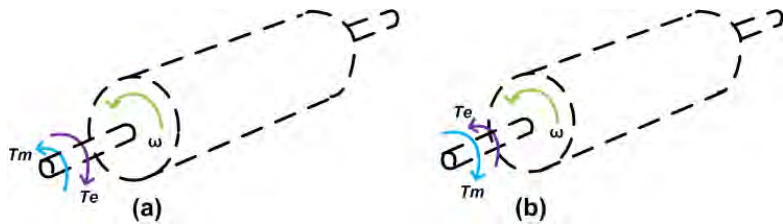
Gambar 2.2 Respon Sudut Rotor Terhadap Gangguan Transien[1]

Pada gambar 2.2 menunjukkan suatu kondisi pada generator sinkron. Pada kondisi 1 menunjukkan kondisi stabil, sudut rotor bertambah hingga maksimum, kemudian mengalami osilasi hingga mencapai kondisi *steady-state*. Kondisi 2 menunjukkan kondisi *first swing instability*, sudut rotor terus bertambah hingga generator kehilangan sinkronisasinya. Sedangkan pada kondisi 3 menunjukkan kondisi *multi swing instability*, osilasi yang semakin bertambah mengakibatkan generator menjadi lepas sinkron.

2.3 Persamaan Ayunan

Kestabilan transien berkaitan dengan keseimbangan antara torsi mekanik dengan torsi elektrik pada setiap mesin sinkron yang terdapat pada sistem tenaga listrik. Jika terjadi gangguan, maka akan terjadi ketidakseimbangan antara torsi mekanik dengan torsi elektrik sehingga menyebabkan percepatan atau perlambatan pada putaran rotor generator.

Pengaturan gerak rotor suatu mesin sinkron berdasarkan pada prinsip dasar dinamika dimana momen percepatan adalah hasil kali momen inersia rotor dan percepatan sudut [2]. Pada gambar 2.3 diilustrasikan suatu rotor dengan membandingkan arah putaran serta momen putar mekanis dan elektrik.



Gambar 2.3 Ilustrasi Arah Perputaran Rotor, Torsi Elektrik dan Torsi Mekanik. (a) pada Generator; (b) pada Motor [2]

Kestabilan transien tergantung pada kondisi awal dan besarnya gangguan. Pada kondisi stabil, besarnya torsi mekanik sama dengan torsi elektrik yang menyebabkan tidak adanya percepatan maupun perlambatan pada rotor. Namun pada saat gangguan timbul ketidakseimbangan antara torsi mekanis dan torsi elektrik, maka akan

menghasilkan nilai torsi yang menyebabkan percepatan atau perlambatan pada rotor seperti pada persamaan berikut :

$$T_a = T_m - T_e \quad (2.1)$$

Dimana :

T_a : Torsi percepatan/perlambatan, dalam satuan N-m

T_m : Torsi mekanik, dalam satuan N-m

T_e : Torsi elektromagnetik, dalam satuan N-m

Inersia gabungan generator dan penggerak utama (*prime over*) dipercepat oleh ketidakseimbangan torsi, sehingga persamaan (2.1) menjadi :

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad (2.2)$$

Keterangan :

J : Momen kelembaman total dari massa rotor dalam satuan $kg-m^2$

θ_m : Pergeseran sudut dari rotor terhadap suatu sumbu yang diam (*stationary*), dalam satuan radian mekanis

t : Waktu dalam detik (*second*)

T_a : Momen putar percepatan bersih, dalam satuan Nm

T_m : Momen putar mekanis atau poros (penggerak) yang diberikan oleh penggerak mula dikurangi dengan momen putar perlambatan (*retarding*) yang disebabkan oleh rugi-rugi perputaran, dalam satuan Nm

T_e : Momen putar listrik atau elektromagnetis bersih, dalam Nm

Persamaan diatas dapat dinormalisasikan ke dalam konstanta inersia per unit H yang didefinisikan sebagai energi kinetik dalam satuan watt-second. ω_{0m} sebagai kecepatan sudut pada kondisi sinkron dalam mekanikal radian perdetik, konstanta inersia yaitu :

$$H = \frac{1}{2} \frac{J \omega_{0m}^2}{VA_{base}} \quad (2.3)$$

Dari persamaan konstanta inersia H diatas, didapatkan momen inersia J yaitu :

$$J = \frac{2H}{\omega_{0m}^2} VA_{base} \quad (2.4)$$

Persamaan (2.4) disubstitusikan ke dalam persamaan (2.2), menjadi :

$$\frac{2H}{\omega_{0m}^2} VA_{base} \frac{d\omega_m}{dt} = T_m - T_e \quad (2.5)$$

Atau

$$2H \frac{d}{dt} \left(\frac{\omega_m}{\omega_{0m}} \right) = \frac{T_m - T_e}{VA_{base}/\omega_{0m}} \quad (2.6)$$

Dimana $T_{base} = VA_{base}/\omega_{0m}$, persamaan diatas diubah menjadi bentuk perunit, sehingga

$$2H \frac{d\bar{\omega}_r}{dt} = \bar{T}_m - \bar{T}_e \quad (2.7)$$

Pada persamaan diatas

$$\bar{\omega}_r = \frac{\omega_m}{\omega_{0m}} = \frac{\omega_r}{\omega_0} \quad (2.8)$$

ω_r adalah kecepatan sudut dari rotor dalam satuan *electrical rad/s*, sedangkan ω_0 adalah kecepatan sudut pada kondisi sinkron dalam satuan *electrical rad/s*.

Jika δ adalah posisi angular dari rotor dalam *electrical radian* yang berhubungan dengan referensi putaran sinkron dan δ_0 adalah nilai pada saat $t = 0$,

$$\delta = \omega_0 t - \omega_0 t + \delta_0 \quad (2.9)$$

Hasil penurunan terhadap waktu, didapatkan

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega_r - \omega_0 = \Delta\omega_r \quad (2.10)$$

Dan

$$\frac{d^2\delta}{dt} = \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{d(\Delta\omega_r)}{dt} = \omega_0 \frac{d\bar{\omega}_r}{dt} = \omega_0 \frac{d(\Delta\bar{\omega}_r)}{dt} \quad (2.11)$$

Substitusikan $d\bar{\omega}_r/dt$ pada persamaan diatas kedalam persamaan 2.5 sehingga didapatkan :

$$\frac{2H}{\omega_0} \frac{d^2\delta}{dt} = \bar{T}_m - \bar{T}_e \quad (2.12)$$

Persamaan 2.12 merupakan persamaan yang menunjukkan persamaan ayunan atau persamaan gerakan pada mesin sinkron. Nilai daya mekanis (P_m) dan daya elektris (P_e) hamper sama dengan nilai torsi mekanis (T_m) dan torsi elektris (T_e).

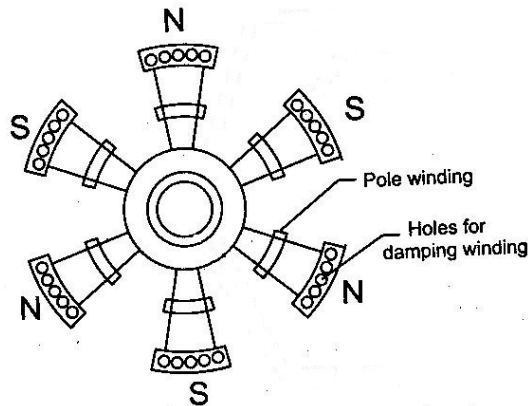
2.4 Critical Clearing Time (CCT)

Gangguan yang besar dapat membuat suatu sistem mengalami perubahan struktural dan mengakibatkan ketidakstabilan dalam sistem. Untuk upaya pencegahan dan keamanan, pada sistem tenaga listrik akan dipasang rele pengaman dan circuit breaker, sehingga diharapkan jika terjadi gangguan pada sistem dapat dideteksi oleh rele pengaman dan rele pengaman dapat memerintahkan circuit breaker untuk bekerja sebagai pemutus. Namun terkadang kemampuan rele pengaman untuk mendeteksi gangguan memerlukan waktu yang lebih lama dari waktu pemutus kritis circuit breaker. Circuit breaker ini harus dapat memutuskan saluran dan gangguan dalam waktu yang singkat, yakni kurang dari waktu pemutus kritisnya, atau biasa disebut critical clearing

time. Jika gangguan diputus kurang dari waktu kritisnya / critical clearing time maka sistem akan kembali stabil. Namun jika gangguan diputus melebihi dari waktu kritisnya atau *critical clearing time*, maka generator akan berada dalam kondisi yang tidak stabil dan menyebabkan sistem pada kondisi yang tidak stabil.

2.5 Damping

Pada mesin sinkron terdapat sebuah lilitan sangkar tupai yang diletakkan pada permukaan kutub rotor. Pada kondisi normal lilitan ini tidak membawa arus apapun karena rotor berputar pada kecepatan sinkronnya. Walaupun demikian saat beban tiba-tiba berubah kecepatan rotor meningkat dengan cepat menghasilkan variasi kecepatan sesaat diatas dan dibawah kecepatan sinkronnya. Hal ini menginduksi tegangan pada lilitan sangkar tupai menyebabkan arus mengalir pada lilitan sangkar tupai tersebut. Arus bereaksi dengan medan magnetik pada stator menghasilkan gaya yang meredam osilasi pada rotor. Hal inilah yang sering disebut dengan *damper winding*. Jadi *Damper Winding* adalah sebuah kumparan peredam berupa batang atau plat tembaga yang terletak pada sepatu kutub pada mesin sinkron yang berfungsi untuk meredam osilasi ketika terjadi perubahan beban secara tiba tiba. Pada motor sinkron *damper winding* diletakkan pada permukaan kutub rotor yang mana ujungnya di hubung singkat.



Gambar 2.4 Damper Winding

Persamaan redaman

$$T_D \cdot \omega = T_D \cdot \dot{\delta} \quad (2.13)$$

Persamaan ayunan dengan adanya redaman

$$M_i \omega_i = P_{mi} - P_{ei}(\delta) - D_i(\omega_i) \quad (2.14)$$

2.6 Gangguan yang Mempengaruhi Kestabilan

2.6.1 Hubung Singkat

Hubung singkat merupakan gangguan yang paling sering terjadi dalam sistem tenaga listrik. Gangguan hubung singkat dapat disebabkan oleh adanya sambaran petir, kegagalan isolasi, ataupun gangguan akibat ranting pohon dan binatang.

Gangguan hubung singkat menyebabkan timbulnya aliran arus dengan nilai yang besar menuju ke titik gangguan. Akibatnya tegangan di sekitar gangguan dapat menurun secara signifikan. Aliran arus yang besar tersebut merupakan jumlah dari arus kontribusi yang berasal dari generator serta motor induksi.

2.6.2 Motor Starting

Penyalan motor induksi dapat dikategorikan sebagai suatu gangguan. Saat suatu motor di-*starting* maka motor tersebut akan menarik arus yang besarnya 5x atau 6x dari arus rating normalnya, hingga motor mencapai 80% atau 90% dari kecepatan sinkronnya. Hal ini dapat mengakibatkan terjadinya *voltage drop* atau penurunan tegangan di sistem.

Drop tegangan yang terjadi saat penyalan motor induksi dapat mempengaruhi kerja dan umur dari peralatan tersebut. Apabila drop tegangan yang terjadi melewati batas atau standar yang ditentukan untuk suatu peralatan listrik dapat menyebabkan stabilitas tegangan sistem menjadi terganggu. Oleh karena itu perlu dilakukan suatu analisis proses starting motor.

2.6.3 Load Shedding

Ketika sistem terkena gangguan yang dapat menyebabkan daya yang tersedia tidak dapat mencukupi kebutuhan beban misalnya akibat lepasnya pembangkit, maka untuk menghindari sistem mengalami keadaan tidak stabil dibutuhkan pelepasan beban.

Pelepasan beban dilakukan dengan tujuan agar jumlah suplai dan permintaan beban dapat seimbang. Pelepasan beban dapat dilakukan dengan dua cara yaitu :

1. Pelepasan beban secara manual

Pada umumnya pelepasan beban secara manual hanya dapat dipakai dalam keadaan tidak begitu genting. Seperti pada perkembangan beban yang melebihi dari tenaga pembangkit atau bahaya yang disebabkan oleh turunnya tegangan atau frekuensi pada daerah tertentu akibat adanya gangguan. Apabila keadaan dianggap berbahaya, maka operator akan dengan segera melakukan pelepasan sebagian beban secara manual.

Kekurangan dari pelepasan beban ini adalah kebutuhan akan operator yang siap dan handal. Karena jika terdapat keterlambatan dalam menyikapi keadaan berbahaya maka akan dapat berakibat fatal bagi sistem.

2. Pelepasan beban secara otomatis

Pada pelepasan beban secara otomatis diperlukan pemasangan alat-alat yang dapat melindungi sistem secara cepat apabila terjadi perubahan frekuensi yang besar didalam sistem. Oleh karena itu perlu digunakan rele frekuensi rendah (*UFR/Under Frequency Relay*) yang dapat mendeteksi nilai frekuensi sistem pada suatu batas tertentu.

BAB 3

PEMODELAN SISTEM

Langkah-langkah perhitungan dalam mendapatkan nilai CCT untuk menghasilkan parameter-parameter awal yang dibutuhkan.

3.1 Power Flow

Perhitungan aliran daya pada dasarnya adalah menghitung besaran tegangan $|V|$ dan sudut fasa tegangan (δ) pada setiap bus pada kondisi ketiga fasa seimbang. Hasil perhitungan ini digunakan untuk menghitung besar aliran daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) disetiap peralatan transmisi, besarnya daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) yang harus dibangkitkan setiap pusat pembangkit serta jumlah rugi-rugi di sistem.

Pada setiap bus ada empat variable operasi yang terkait, yaitu daya aktif (P), dan daya reaktif (Q), besaran tegangan $|V|$, dan sudut fasa tegangan (δ), supaya persamaan aliran daya dapat dihitung, dua dari empat variable diatas harus diketahui untuk setiap bus, sedangkan dua variable lainnya harus dihitung.

Jenis bus dalam perhitungan load flow dikelompokkan menjadi tiga tipe bus, yaitu:

1. Bus beban yaitu bus yang variabelnya diketahui daya aktif (P), dan daya reaktif (Q). kemudian akan dihitung besaran tegangan $|V|$, dan sudut fasa tegangan (δ).
2. Bus pembangkit yaitu bus yang variabelnya diketahui daya aktif (P), tegangan $|V|$, sedangkan daya reaktif (Q), dan sudut fasa tegangan (δ) merupakan yang dicari atau dihitung.
3. Bus slack atau swing yaitu bus yang merupakan pembangkit terbesar yang memenuhi kekurangan atau mengkompensasi daya aktif (P), daya reaktif (Q) dari sistem dan besarnya dicari, sedangkan variabel yang diketahui adalah besaran tegangan $|V|$, dan sudut fasa tegangan (δ), sudut fasa pada bus ini merupakan sudut acuan dari perubahan sudut.

Power flow merupakan langkah pertama untuk mendapatkan nilai CCT. Dari proses power flow akan didapatkan parameter-parameter awal yang akan dilakukan iterasi pada langkah selanjutnya. Dalam proses ini akan dilakukan pembacaan data dan pemilahan data-data yang

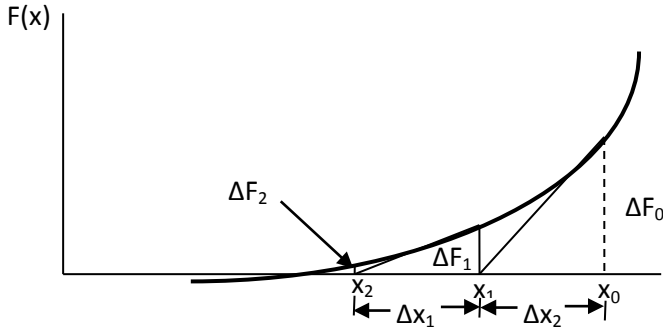
diperlukan. Selanjutnya akan dilakukan penomoran pada bus-bus yang saling terhubung, baik itu bus beban ataupun bus generator dalam bentuk matrik Y_{bus} seperti pada persamaan (3.1)

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Dengan menggunakan matrik admitansi sistem dan persamaan umum aliran daya, load flow dapat dihitung:

$$P_i - jQ_i = V_i^* \sum_{j=1}^n V_j Y_{ij} \quad (3.2)$$

Salah satu metode yang digunakan dalam proses aliran daya adalah metode newton raphson, dimana metode ini untuk mendapatkan turunan persamaan matematika dalam penentuan matrik jacobian. Matrik jacobian adalah dasar dari perhitungan iterasi dengan menghilangkan parameter-parameter yang dianggap perlu dihilangkan, sehingga proses *power flow* tidak membutuhkan waktu yang lama. Metode newton raphson dapat digambarkan sebagai berikut.



Gambar 3.1 Ilustrasi Metode Newton Raphson

Persamaan deret taylor dapat dituliskan dengan persamaan berikut :

$$f(x) = f(x_0) + \frac{1}{1!} \frac{df(x_0)}{dx} (x - x_0) + \frac{1}{2!} \frac{d^2 f(x_0)}{dx^2} (x - x_0)^2 + \dots + \frac{1}{n!} \frac{d^n f(x_0)}{dx^n} (x - x_0)^n \quad (3.3)$$

Pada proses aliran daya parameter yang digunakan antara lain daya aktif (P), dan daya reaktif (Q) untuk dapat memperoleh hasil parameter baru berdasarkan sistem yang digunakan. Persamaan awal daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) yang selanjutnya akan diturunkan adalah :

$$P = VI \cos \theta \quad (3.4)$$

$$Q = VI \sin \theta \quad (3.5)$$

Dimana $I = V.Y$

Dengan mensubstitusi persamaan (3.4) dan (3.5) akan didapatkan persamaan untuk single machine :

$$P = V_1 V_2 Y \cos(\delta_1 - \delta_2 - \theta) \quad (3.6)$$

$$Q = V_1 V_2 Y \sin(\delta_1 - \delta_2 - \theta) \quad (3.7)$$

Untuk dapat digunakan pada banyak mesin atau multimesin dapat dikembangkan menjadi persamaan berikut ini :

$$P_1 = Y_{11} V_1 V_1 \cos(\theta_{11} + \delta_1 - \delta_1) + Y_{12} V_1 V_2 \cos(\theta_{12} + \delta_1 - \delta_2) + \dots + Y_{1n} V_1 V_n \cos(\theta_{1n} + \delta_1 - \delta_n) \quad (3.8)$$

$$Q_1 = Y_{11} V_1 V_1 \sin(\theta_{11} + \delta_1 - \delta_1) + Y_{12} V_1 V_2 \sin(\theta_{12} + \delta_1 - \delta_2) + \dots + Y_{1n} V_1 V_n \sin(\theta_{1n} + \delta_1 - \delta_n) \quad (3.9)$$

Dapat disederhanakan menjadi :

$$P_1 = V_1^2 Y_{11} \cos(\theta_{11}) + Y_{12} V_1 V_2 \cos(\theta_{12} + \delta_1 - \delta_2) + \dots + Y_{1n} V_1 V_n \cos(\theta_{1n} + \delta_1 - \delta_n) \quad (3.10)$$

$$Q_1 = V_1^2 Y_{11} \sin(\theta_{11}) + Y_{12} V_1 V_2 \sin(\theta_{12} + \delta_1 - \delta_2) + \dots + Y_{1n} V_1 V_n \sin(\theta_{1n} + \delta_1 - \delta_n) \quad (3.11)$$

Dengan mensubstitusi persamaan berikut ini:

$$Y = G + jB \quad (3.12)$$

$$G = Y \cos \theta ; B = Y \sin \theta \quad (3.13)$$

Kedalam persamaan (3.10) dan (3.11) akan didapatkan persamaan berikut :

$$P_1 = V_1^2 G_{11} + Y_{12} V_1 V_2 \cos(\theta_{12} + \delta_1 - \delta_2) + \dots + Y_{1n} V_1 V_n \cos(\theta_{1n} + \delta_1 + \delta_n) \quad (3.14)$$

$$Q_1 = V_1^2 B_{11} + Y_{12} V_1 V_2 \sin(\theta_{12} + \delta_1 - \delta_2) + \dots + Y_{1n} V_1 V_n \sin(\theta_{1n} + \delta_1 + \delta_n) \quad (3.15)$$

Persamaan umum dapat dituliskan dengan mengganti bus ke-1 menjadi bus ke-i dan bus ke-2 menjadi bus ke-j.

$$P_i = V_i^2 G_{ii} + \sum_{i,i \neq j}^n Y_{ij} V_i V_j \cos(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \quad (3.16)$$

$$Q_i = V_i^2 B_{ii} - \sum_{i,i \neq j}^n Y_{ij} V_i V_j \sin(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \quad (3.17)$$

Dimana:

P_i : daya aktif terbangkit pada bus ke-i

Q_i : daya reaktif terbangkit pada bus ke-i

Y_{ij}, θ_{ij} : magnitude dan sudut fase elemen matrik admitansi Y

V_i, δ_i : magnitude tegangan dan sudut fase pada bus ke-i

V_j, δ_j : magnitude tegangan dan sudut fase pada bus ke-j

Selanjutnya untuk mencari aliran daya adalah dengan menghilangkan parameter – parameter yang tidak diperlukan menggunakan jacobian matrik. Pada jacobian matrik terdapat 4 komponen utama, yakni komponen H, komponen N, komponen J, dan komponen L.

$$Jacobian\ matrik = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Dimana:

$$H = \frac{\partial P_i}{\partial \theta_j} \quad (3.19)$$

$$N = \frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} |V_j| \quad (3.20)$$

$$J = \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} \quad (3.21)$$

$$L = \frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} |V_j| \quad (3.22)$$

Untuk dapat mencari aliran daya, dapat dituliskan :

$$\begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \frac{\Delta|V|}{|V|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Dari perkalian matrik jacobian diatas akan didapatkan nilai dari $\Delta\theta_i$ dan $\Delta|V_i|$ yang akan digunakan sebagai parameter baru yakni sudut dan magnitudo tegangan tiap bus.

$$\theta_i^{(k+1)} = \theta_i^{(k)} + \Delta\theta_i \quad (3.24)$$

$$|V_i|^{(k+1)} = |V_i|^{(k)} + \Delta|V_i| \quad (3.25)$$

dimana :

$(k+1)$: jumlah iterasi *newton raphson*

$\Delta\theta_i$: Perubuaan sudut tegangan pada bus ke-*i*

$\Delta|V_i|$: Perubahan magnitudo tegangan pada bus ke-*i*

Kemudian selisih daya aktif dan reaktif tiap bus yang baru dengan yang lama akan dibandingkan. Apabila nilai ketelitian telah tercapai, maka proses iterasi selesai, namun sebaliknya, jika nilai ketelitian belum tercapai maka iterasi akan dilanjutkan.

3.2 Reduksi Matrik

Sistem yang kompleks menyebabkan analisis perhitungan matematis kestabilan transien menjadi lebih sulit. Untuk mempermudah hal tersebut perlu dilakukan reduksi agar lebih mudah dalam analisis dan perhitungan matematis yang akan dilakukan. Dalam hal ini menggunakan reduksi kron. Reduksi kroon adalah metode mereduksi bus beban dari matrik admitansi, sebab tidak ada arus yang masuk ataupun keluar sehingga bernilai nol. Untuk menjelaskan matrik admitansi dari sistem dapat dilihat pada persamaan dibawah ini :

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \\ I_{n+1} \\ \vdots \\ I_{n+m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1n} & Y_{1(n+1)} & Y_{1(n+2)} & \cdots & Y_{1(n+m)} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2n} & Y_{2(n+1)} & Y_{2(n+2)} & \cdots & Y_{2(n+m)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdots & Y_{nn} & Y_{n(n+1)} & Y_{n(n+2)} & \cdots & Y_{n(n+m)} \\ Y_{(n+1)1} & \cdots & \cdots & Y_{(n+1)n} & Y_{(n+1)(n+1)} & \cdots & Y_{(n+1)(n+m)} \\ \vdots & & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{(n+m)1} & \cdots & \cdots & Y_{(n+m)n} & Y_{(n+m)(n+1)} & \cdots & Y_{(n+m)(n+m)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \\ E_{n+1} \\ \vdots \\ E_{n+m} \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Agar lebih sederhana maka matrik di atas dapat ditulis sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} I_n \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_n & Y_{nm} \\ Y_{nm}^t & Y_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_n \\ E_m \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Dimana lambang n merepresentasikan bus beban sedangkan lambang m merepresentasikan bus generator. Karena tidak ada arus yang mengalir pada bus beban, maka I_n bernilai nol, sehingga persamaan matrik menjadi:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_n & Y_{nm} \\ Y_{nm}^t & Y_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_n \\ E_m \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Sehingga dari perkalian matrik di atas dapat diturunkan menjadi dua persamaan matematis

$$Y_n V_n + Y_{nm} E_m = 0 \quad (3.29)$$

$$V_n = - \left(\frac{Y_{nm} E_m}{Y_n} \right) = -(Y_n^{-1} Y_{nm} E_m) \quad (3.30)$$

$$Y_{nm}^t V_n + Y_{mm} E_m = I_m \quad (3.31)$$

Dengan menstutbitusikan persamaan V_n pada persamaan kedalam persamaan maka akan didapatkan persamaan:

$$I_m = Y_{nm}^t (-Y_n^{-1} Y_{nm} E_m) + Y_{mm} E_m \quad (3.32)$$

$$I_m = -(Y_{nm}^t Y_n^{-1} Y_{nm} E_m) + Y_{mm} E_m \quad (3.33)$$

Secara sederhana, persamaan tersebut dapat ditulis dengan persamaan:

$$I_m = Y_{reduksi} E_m \quad (3.34)$$

sehingga:

$$Y_{reduksi} = Y_{mm} - Y_{nm}^t Y_n^{-1} Y_{nm} \quad (3.35)$$

Dengan demikian sistem yang begitu kompleks menjadi lebih sederhana sehingga mempermudah dalam perhitungan.

3.3 Pemodelan Sistem

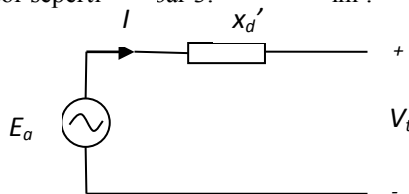
Sistem dimodelkan seperti pada persamaan berikut ini :

$$M \dot{\omega} = P_m - P_e \quad (3.36)$$

dimana :

- M : momen inersia
- P_m : daya mekanis
- P_e : daya listrik

Untuk mendapatkan nilai P_m dapat dicari dengan memodelkan generator seperti gambar 3.2 dibawah ini :



Gambar 3.2 Pemodelan Generator

Dari pemodelan generator diatas dapat ditulis dengan persamaan:

$$E_a = j x'_d I + V_t \quad (3.37)$$

Dengan menstutitusikan persamaan (3.38) ke dalam persamaan (3.37).

$$I = \frac{S}{V} \quad (3.38)$$

dimana:

$$S = P + jQ \quad (3.39)$$

Maka didapat persamaan:

$$E_a = V_t + j x'_d \cdot \frac{S}{V} \quad (3.40)$$

Dengan demikian daya mekanis dari generator dapat dicari dengan persamaan :

$$P_m = E_a^* \cdot Y_{red_pre} \cdot E_a \quad (3.41)$$

Untuk daya elektris (P_e) dapat dicari dengan persamaan :

$$P_e = v \cdot (Y_{red_post} \cdot v)^* \quad (3.42)$$

Dimana v dapat dicari dari persamaan

$$v = E_a^{j\theta} \quad (3.43)$$

dan θ merupakan hasil iterasi yang inisial awalnya adalah θ_{coi}

$$\theta_{coi} = \delta_i - \delta_0 \quad (3.44)$$

Dimana δ_i merupakan sudut rotor generator, sedangkan δ_0 merupakan jumlah momen inersia dan sudut rotor generator kemudian dibagi dengan jumlah total momen inersia.

$$\delta_0 = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^n M_i \delta_i \quad (3.45)$$

Dengan menggunakan persamaan dari pemodelan sistem diatas (3.36) maka akan diperlukan referensi yang berbeda-beda, oleh karena itu perlu ditransformasikan kedalam persamaan center of angel (coa) / center of inertia (coi) dimana:

$$P_{coi} = \sum_{i=1}^n P_{mi} - P_{ei} \quad (3.46)$$

Sehingga persamaan ayunan menjadi:

$$M_i \ddot{\omega} = P_{mi} - \dot{P}_{ei} - \frac{M_i}{M_t} P_{coi} \quad (3.47)$$

Dimana :

- P_{mi} : daya mekanis
- P_{ei} : daya elektrik
- M_i : momen inersia
- M_T : total momen inersia

3.4 Swing Equation

Dalam kondisi normal posisi normal dari sudut rotor dengan sudut medan magnet menjadi satu atau tidak ada resultan, sudut antara keduanya diberi nama sudut daya atau sudut torsi [2]sewaktu ada gangguan rotor akan mengalami perlambatan atau percepatan. Keadaan sinkron adalah dimana dikatakan torsi mekanis sama dengan torsi elektrik.

$$T_e = T_m \quad (3.48)$$

Keadaan dari keadaan sinkron dapat berubah bila ada gangguan yaitu rotor mengalami percepatan jika $T_m > T_e$ atau mengalami perlambatan jika $T_m < T_e$

$$T_a = T_m - T_e \quad (3.49)$$

Persamaan redaman

$$T_D \cdot \omega = T_D \cdot \dot{\delta} \quad (3.50)$$

Hukum newton

$$J\alpha = T_a = \sum T \quad (3.51)$$

$$J\ddot{\delta} = T_m - T_D\dot{\delta} - T_e \quad (3.52)$$

Dimana :

- J : Momen inersia
- α : Percepatan sudut
- T_D : Koefisien redaman
- T_e : Torsi elektrik
- δ : Sudut rotor

Bila

$$P = \sigma \cdot \omega \quad (3.53)$$

Persamaan 3.53 dinyatakan dalam *power*

$$M_i \omega_i = P_{mi} - P_{ei} - \frac{M_i}{M_T} P_{COA} - D_i(\omega_i) \quad (3.54)$$

$$\dot{\delta}_i = \omega_i \quad (3.55)$$

Dimana

$$M_T = \sum_{i=1}^n M_i \quad (3.56)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^n M_i \omega_i \quad (3.57)$$

$$\delta_0 = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^n M_i \delta_i \quad (3.58)$$

$$\theta_i = \delta_i - \delta_0 \quad (3.59)$$

$$\omega_i = \omega_i - \omega_0 \quad (3.60)$$

$$P_{COA} = \sum_{i=1}^n (P_{mi} - P_{ei}(\delta)) \quad (3.61)$$

$$P_{ei}(\delta) = \sum_{i=1}^n V_i V_j Y_{ij} (\delta_i - \delta_j + \theta_{ij}) \quad (3.62)$$

3.5 Metode Runge Kutta

Metode runge kutta memperkirakan penyelesaian dari deret taylor, meskipun tidak seperti penyelesaian deret taylor yang sesungguhnya. Metode runge kutta tidak membutuhkan evaluasi eksplisit dari turunan yang lebih tinggi dari sebelumnya. Efek dari adanya turunan yang lebih tinggi adalah dimasukkannya beberapa evaluasi dari turunan pertama.

Dalam metode ini akan digunakan runge kutta orde 4 dimana nilai X diperoleh ketika $t = t_0 + \Delta t$ yang secara umum memiliki persamaan :

$$X_{n+1} = X_n + \frac{1}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (3.48)$$

Dimana,

$$k_1 = f(x_n, t_n) \Delta t \quad (3.49)$$

$$k_2 = f(x_n + \frac{k_1}{2}, t_n + \frac{\Delta t}{2}) \Delta t \quad (3.50)$$

$$k_3 = f(x_n + \frac{k_2}{2}, t_n + \frac{\Delta t}{2}) \Delta t \quad (3.51)$$

$$k_4 = f(x_n + k_3, t_n + \Delta t) \Delta t \quad (3.52)$$

Intepretasi fisik dari persamaan diatas adalah :

k_1 = (lengkungan pada saat awal *time step*)* Δt

k_2 = (pendekatan pertama pada lengkungan di pertengahan step)* Δt

k_3 = (pendekatan kedua pada lengkungan di pertengahan step)* Δt

k_4 = (lengkungan pada akhir step)* Δt

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

BAB 4

SIMULASI DAN ANALISIS

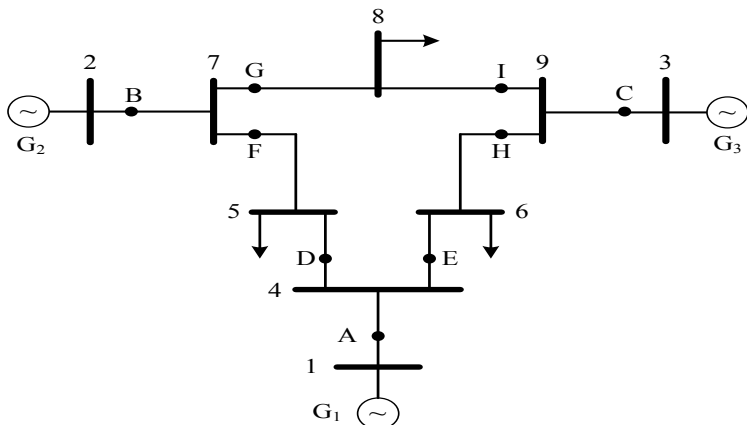
Pada bab ini, simulasi akan dilakukan pada sistem yang menunjukkan sistem multimesin. Sistem yang digunakan adalah sistem tenaga listrik Anderson dan Fouad 3 generator-9 bus. Dari hasil simulasi ini akan didapat parameter-parameter yang diperlukan dalam perhitungan *critical clearing time (CCT)*. Pada simulasi ini juga terbatas pada beban dinamis.

Pada simulasi ini, *running program* dilakukan menggunakan PCU dengan spesifikasi sebagai berikut :

System Model	: Satellite L745
Processor	: Intel(R) core (TM) i3-2310M CPU @ 2.10GHz (4 CPUs), ~2.1GHz
Memory	: 2048MB RAM
DirectX Version	: DirectX 11
Operating System	: Windows 7 Ultimate 32-bit (6.1, Build7601)

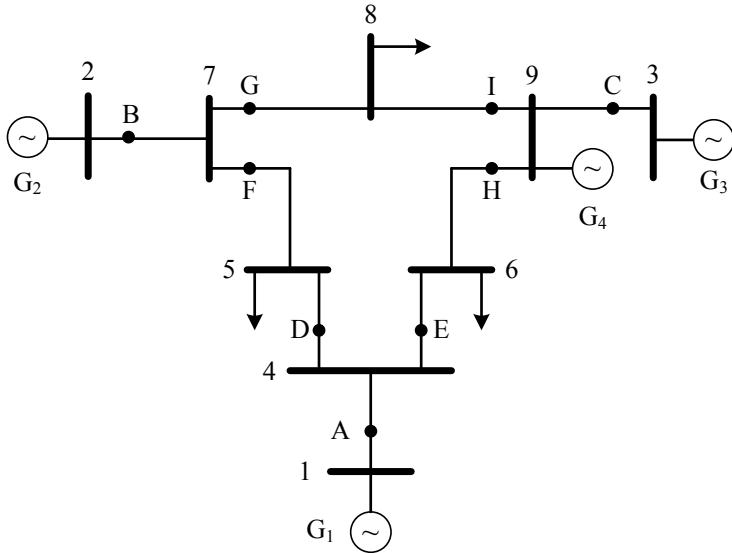
4.1 Data Sistem 3 Generator 9 Bus dan 4 Generator 9 Bus

Dalam membuktikan metode *Time Domain Simulation*, akan dilakukan simulasi perhitungan pertama pada sistem 3 generator 9 bus. Single line diagram dari sistem tersebut ditunjukkan pada gambar 4.1.



Gambar 4.1. *Single Line Diagram* Sistem 3 Generator – 9 Bus

Dalam membuktikan metode *Time Domain Simulation*, akan dilakukan simulasi perhitungan pertama pada sistem 4 generator 9 bus, dimana generator 4 menjadi motor sehingga sistem ini hanya menggunakan 3 generator. Pada simulasi ini generator 4 sebagai motor diberi nilai negative pada P generator (MW) dan Q generator (MVAR) nya. Single line diagram ditunjukkan pada gambar 4.2



Gambar 4.2. Single Line Diagram Sistem 4 Generator – 9 Bus

Dari sistem tersebut ditentukan letak titik – titik gangguan yang akan diuji. Pada pengujian ini ditentukan 9 titik gangguan, antara lain:

- A : titik gangguan antara bus 1 dan bus 4
- B : titik gangguan antara bus 2 dan bus 7
- C : titik gangguan antara bus 3 dan bus 9
- D : titik gangguan antara bus 4 dan bus 5
- E : titik gangguan antara bus 4 dan bus 6
- F : titik gangguan antara bus 7 dan bus 5
- G : titik gangguan antara bus 7 dan bus 8
- H : titik gangguan antara bus 9 dan bus 6
- I : titik gangguan antara bus 9 dan bus 8

Pada tabel 4.1 ditunjukkan spesifikasi data dari transmisi sistem 3 generator-9 bus. Pada table 4.2 menunjukkan spesifikasi data dari bus sistem 3 generator-9 bus.

Tabel 4.1. Data Transmisi Sistem 3 Generator – 9 Bus (Statik)

No. Line	Dari Bus	Menuju Bus	R	X	Half Line Charging Susceptance (pu)
1	1	4	0,0000	0,0576	0,0000
2	2	7	0,0000	0,0625	0,0000
3	3	9	0,0000	0,0586	0,0000
4	4	5	0,0100	0,0850	0,0880
5	4	6	0,0170	0,0920	0,0790
6	5	7	0,0320	0,1610	0,1530
7	6	9	0,0390	0,1700	0,1790
8	7	8	0,0085	0,0720	0,0745
9	8	9	0,0119	0,1008	0,1045

Tabel 4.2. Data Bus Sistem 3 Generator – 9 Bus (Statik)

No. Bus	P Generator (MW)	Q Generator (MVAR)	P Beban (MW)	Q Beban (MVAR)
1	200	0,00	0,00	0,00
2	163	0,00	0,00	0,00
3	85,0	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,00	0,00	125	50,0
6	0,00	0,00	90,0	30,0
7	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0,00	0,00	100	35,0
9	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabel 4.3. Data Transmisi Sistem 4 Generator – 9 Bus (Motor)

No. Line	Dari Bus	Menuju Bus	R	X	Half Line Charging Susceptance (pu)
1	1	4	0,0000	0,0576	0,0000
2	2	7	0,0000	0,0625	0,0000
3	3	9	0,0000	0,0586	0,0000
4	4	5	0,0100	0,0850	0,0880
5	4	6	0,0170	0,0920	0,0790
6	5	7	0,0320	0,1610	0,1530
7	6	9	0,0390	0,1700	0,1790
8	7	8	0,0085	0,0720	0,0745
9	8	9	0,0119	0,1008	0,1045

Tabel 4.4. Data Bus Sistem 4 Generator – 9 Bus (Motor)

No. Bus	P Generator (MW)	Q Generator (MVAR)	P Beban (MW)	Q Beban (MVAR)
1	200	0,00	0,00	0,00
2	163	0,00	0,00	0,00
3	85,0	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,00	0,00	125	50,0
6	0,00	0,00	90,0	30,0
7	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0,00	0,00	100	35,0
9	-15	-10	0,00	0,00

4.2 Penentuan Parameter Awal

Setelah ditentukan titik gangguan pada sistem, maka akan dicari aliran daya pada sistem tersebut. Melalui proses aliran daya akan didapatkan parameter awal yang akan digunakan pada proses iterasi selanjutnya. Parameter – parameter yang akan didapatkan dari proses

aliran daya antara lain, daya mekanis generator (P_m), tegangan pada bus generator (v), daya aktif generator (s), dan tegangan pada generator (E_a).

Tabel 4.5. Parameter yang Didapatkan Dari Aliran Daya Sistem 3 Generator – 9 Bus (Statik)

Gen	Pm (p.u)	V (p.u)	S (p.u)	Ea (p.u)
1	0,8617	1,0400+0,000i	0,7164+0,2705i	1,0558+0,0419i
2	1,6300	1,0116+0,1653i	1,6300+0,0665i	0,9885+0,3546i
3	0,8500	1,0216+0,0834i	0,8500-0,1086i	0,9902+0,2316i

Tabel 4.6. Parameter yang Didapatkan Dari Aliran Daya Sistem 4 Generator – 9 Bus (Motor)

Gen	Pm (p.u)	V (p.u)	S (p.u)	Ea (p.u)
1	0,8617	1,0400+0,000i	0,8617+0,2742i	1,0560+0,0504i
2	1,6300	1,0149+0,1438i	1,6300+0,0822i	0,9976+0,3338i
3	0,8500	1,0237+0,0525i	0,8500-0,0298i	1,0107+0,2023i
4	-0,1500	1,0278+0,0040i	-0,1500-0,1000i	0,9928-0,0490i

Selanjutnya akan ditentukan nilai daya listrik generator (P_e) pada setiap titik gangguan. Dengan menggunakan persamaan (3.42), maka didapat nilai daya listrik generator (P_e) pada setiap titik gangguan sebagai berikut :

Tabel 4.7. Daya Listrik 3 Generator – 9 Bus Tanpa Damping (statik)

Pe Tiap Titik Gangguan (p.u)			
Gangguan	Generator 1	Generator 2	Generator 3
A	3,2569	-0,2774	-0,7988
B	2,1536	-0,6548	1,5186
C	2,1038	-0,0820	1,1249
D	-0,6420	1,1078	0,6957
E	2,0044	-0,6897	1,6959
F	2,3902	0,2072	-1,1970
G	-1,8194	1,5011	2,0477

Lanjutan Tabel 4.7. Daya Elektris 3 Generator – 9 Bus Tanpa Damping (statik)

Pe Tiap Titik Gangguan (p.u)			
Gangguan	Generator 1	Generator 2	Generator 3
H	2,7233	1,4653	-2,0571
I	1,4076	-0,3575	0,0232

Tabel 4.8. Daya Elektris 3 Generator – 9 Bus dengan Damping (statik)

Pe Tiap Titik Gangguan (p.u)			
Gangguan	Generator 1	Generator 2	Generator 3
A	0,8152	1,2381	1,1173
B	1,9601	-2,0489	2,0321
C	2,7982	0,0617	0,2515
D	-0,5665	1,2487	0,3724
E	2,7446	-0,7991	-0,4619
F	-1,4298	1,8802	1,1996
G	2,1528	-0,2170	-0,7442
H	1,5715	0,1957	-0,5759
I	1,2198	0,1467	1,7417

Tabel 4.9. Daya Elektris 4 Generator – 9 Bus Tanpa Damping (motor)

Pe Tiap Titik Gangguan (p.u)				
Gangguan	Generator 1	Generator 2	Generator 3	Motor
A	-2,0347	2,2366	1,3206	0,6633
B	1,4642	-0,8120	1,4159	0,9426
C	-0,1245	0,9557	-0,1954	0,5575
D	0,7516	-1,1716	1,2300	1,8646
E	3,6032	0,1769	0,0171	-1,1293
F	-1,6533	2,5312	0,9133	0,1230
G	0,8265	0,7513	0,4576	-0,7407
H	1,3082	-0,5651	0,5164	-0,2743
I	0,0798	2,7710	0,1515	-1,2221

Tabel 4.10.Daya Elektris 4 Generator – 9 Bus dengan Damping (Motor)

Pe Tiap Titik Gangguan (p.u)				
Gangguan	Generator 1	Generator 2	Generator 3	Motor
A	-1,8411	2,2926	1,1508	-0,0770
B	0,1881	1,4411	0,3253	-0,4590
C	0,7426	2,6077	0,0232	-0,3533
D	-1,4507	2,1098	0,7547	-0,0395
E	1,3484	1,9457	0,9390	-0,1211
F	0,0458	3,1260	-0,2314	-0,7427
G	1,7338	-2,1446	1,5064	0,5907
H	1,8415	0,2552	0,0067	-0,6973
I	0,5491	0,4698	0,3013	-0,1984

4.3 Perhitungan *Critical Clearing Time* (CCT) Untuk Setiap Gangguan Pada Sistem 3 Generator – 9 Bus dan 4 Genarator – 9 Bus

Pada hasil akhir simulasi ini didapatkan nilai CCT pada masing-masing gangguan. Setiap gangguan memiliki nilai CCT yang berbeda-beda. Dengan menggunakan *Time Domain Simulation* pada Tugas Akhir in, maka dapat digunakan untuk model umum kestabilan sistem tenaga listrik dan mampu memberikan respon waktu untuk semua variable keadaan. Dengan trial n error mecoba mencari waktu CCT yaitu waktu antara sistem stabil dan sistem waktu tidak stabil.

Waktu stabil merupakan waktu pemutusan saluran, dimana sistem terlihat kembali ke keadaan semula atau stabil yang digambarkan grafik berwarna biru dalam hasil simulasi pada gambar 4.3. Sedangkan waktu tidak stabil merupakan waktu pemutusan saluran dengan keadaan dimana grafik hasil simulasi terlihat tidak kembali ke keadaan semula, dalam grafik ditunjukkan dengan warna merah. Harga cct merupakan waktu kritis yaitu diperoleh diantara waktu stabil dan waktu tidak stabil. Pada contoh gambar 4.3 di bawah gangguan terjadi dititik A, diperoleh waktu stabil 0,342 S dan waktu tidak stabil 0,343 S. Jadi, waktu CCT sistem 3 generator 9 bus tanpa menggunakan damping pada gangguan dititik A adalah antar 0,342 s dengan 0,343 s.

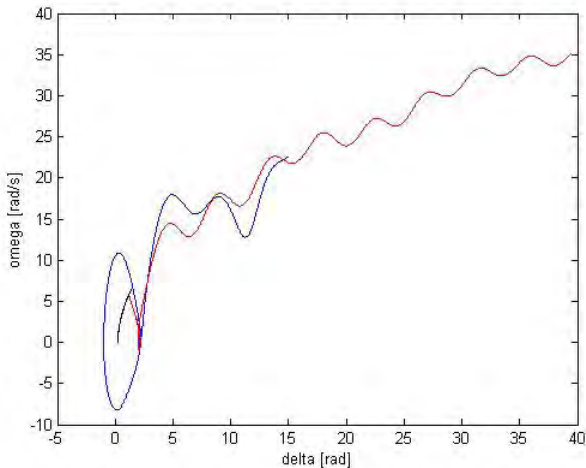
Grafik yang ditampilkan berupa kecepatan sudut rotor (ω) terhadap waktu (s), grafik sudut rotor (δ) terhadap waktu (s) dan grafik

sudut rotor (δ) dengan kecepatan sudut rotor (ω). Simulasi dilakukan terhadap 9 titik gangguan sebagai berikut :

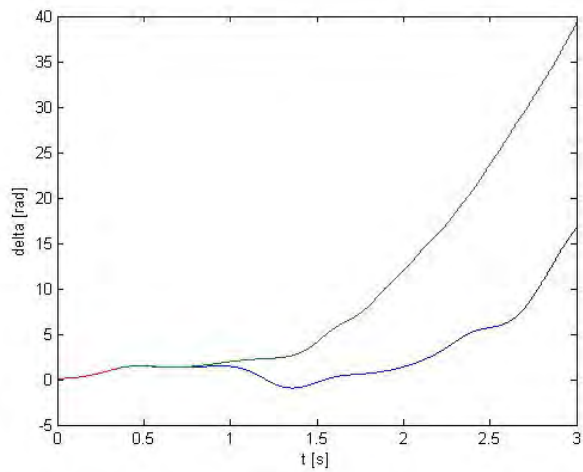
Analisa kestabilan transien pada sistem 3 generator 9 bus tanpa menggunakan damping

1. Kondisi gangguan pada titik A

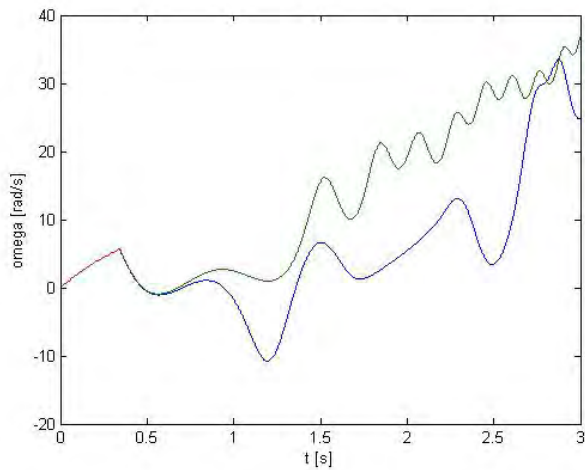
Pada titik gangguan ini terlihat bahwa dengan menggunakan metode *Time Domain Simulation* didapatkan waktu pemutusan kondisi stabil adalah 0,342 sedangkan waktu pemutusan tidak stabil adalah 0,343. Pada grafik menggambarkan bahwa warna merah adalah kondisi tidak stabil sedangkan warna biru adalah kondisi stabil.



Gambar 4.3. Grafik kaarakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan A pada sistem 3 generator-9 bus tanpa menggunakan *damping*



(a)

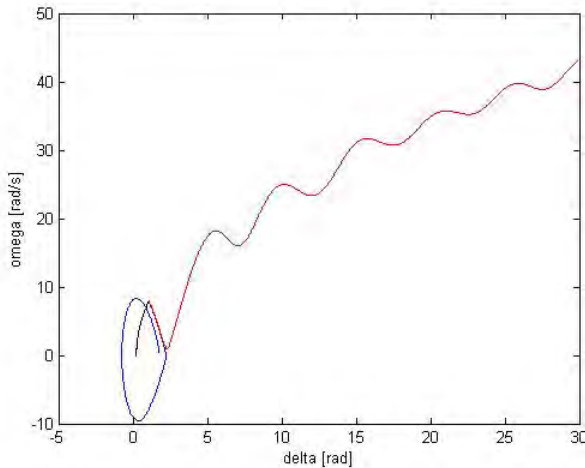


(b)

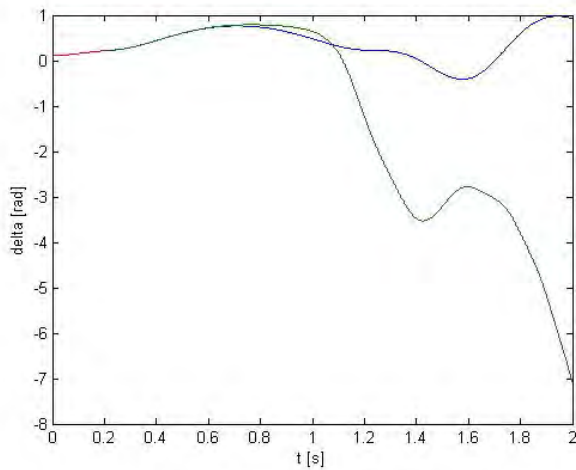
Gambar 4.4 (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan A pada sistem 3 generator-9 bus tanpa *damping*

2. Kondisi gangguan pada titik B

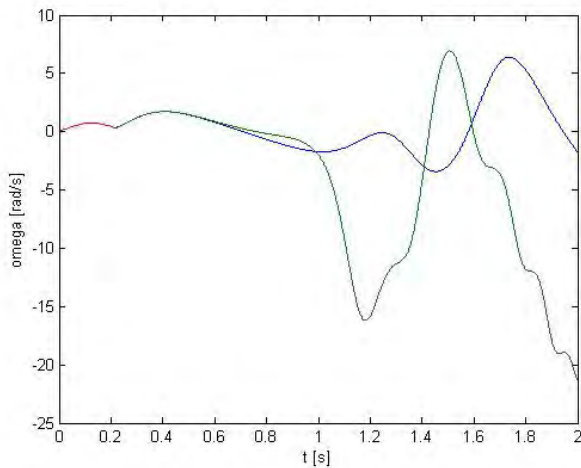
Pada titik gangguan ini terlihat bahwa dengan menggunakan metode *Time Domain Simulation* didapatkan waktu pemutusan kondisi stabil adalah 0,213 sedangkan waktu pemutusan tidak stabil adalah 0,214. Pada grafik menggambarkan bahwa warna merah adalah kondisi tidak stabil sedangkan warna biru adalah kondisi stabil.



Gambar 4.5. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan B pada sistem 3 generator-9 bus tanpa menggunakan *damping*



(a)

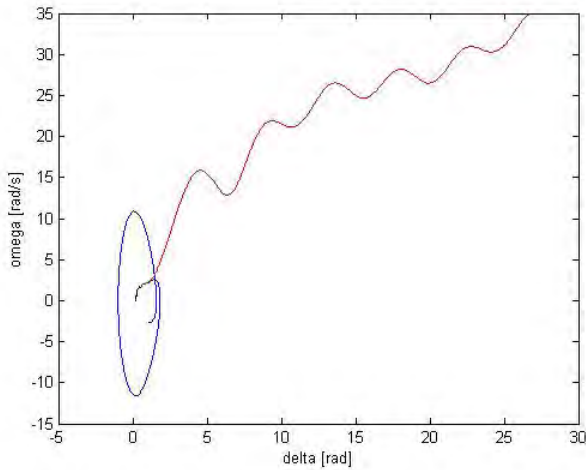


(b)

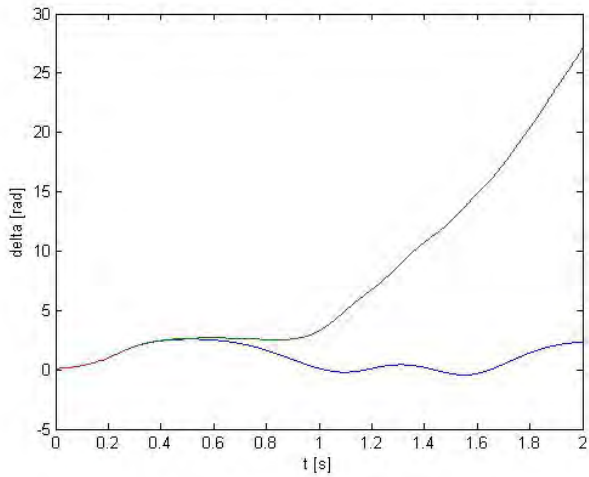
Gambar 4.6. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan B pada sistem 3 generator-9 bus tanpa *damping*

3. Kondisi gangguan pada titik C

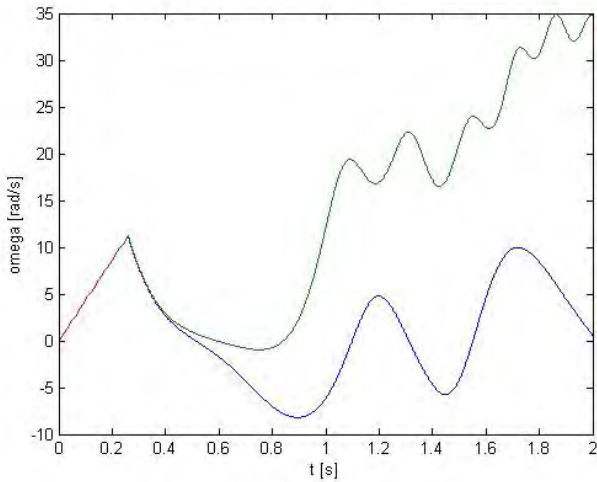
Pada titik gangguan ini terlihat bahwa dengan menggunakan metode *Time Domain Simulation* didapatkan waktu pemutusan kondisi stabil adalah 0,259 sedangkan waktu pemutusan tidak stabil adalah 0,260. Pada grafik menggambarkan bahwa warna merah adalah kondisi tidak stabil sedangkan warna biru adalah kondisi stabil. Dari gambar tersebut terlihat bahwa terjadi kondisi multising instability.



Gambar 4.7. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan C pada sistem 3 generator-9 bus tanpa menggunakan *damping*



(a)

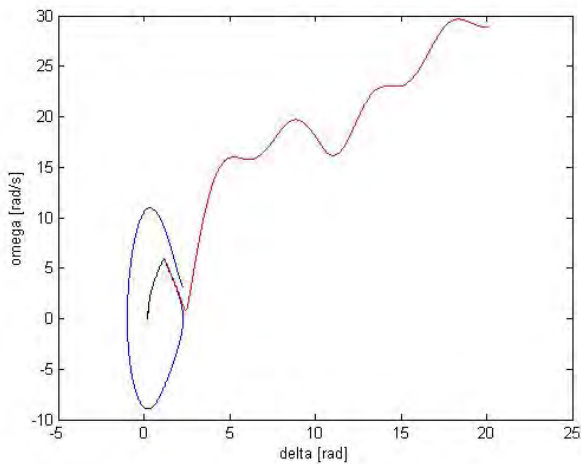


(b)

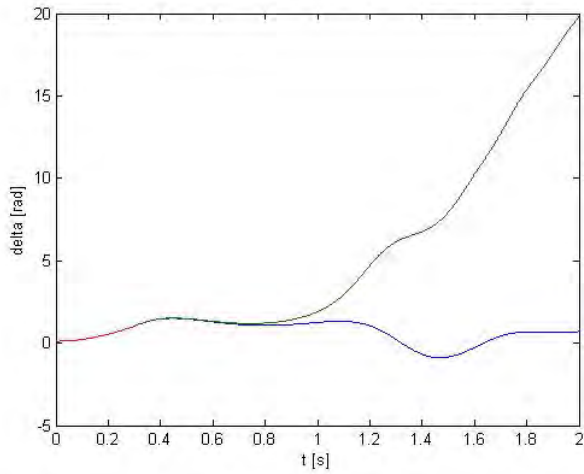
Gambar 4.8. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan C pada sistem 3 generator-9 bus tanpa *damping*

4. Kondisi gangguan pada titik D

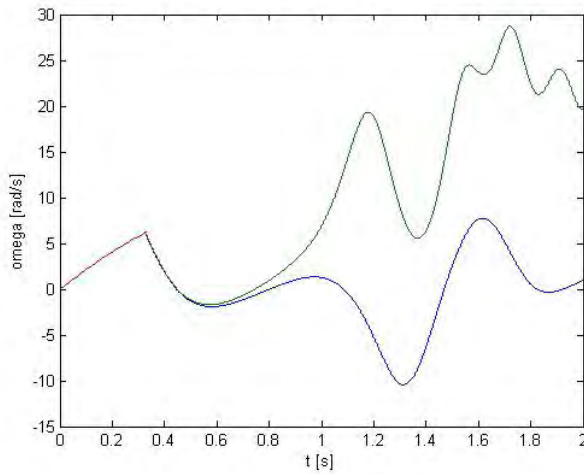
Pada titik gangguan ini terlihat bahwa dengan menggunakan metode *Time Domain Simulation* didapatkan waktu pemutusan kondisi stabil adalah 0,326 sedangkan waktu pemutusan tidak stabil adalah 0,327. Pada grafik menggambarkan bahwa warna merah adalah kondisi tidak stabil sedangkan warna biru adalah kondisi stabil.



Gambar 4.9. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan D pada sistem 3 generator-9 bus tanpa menggunakan *damping*



(a)

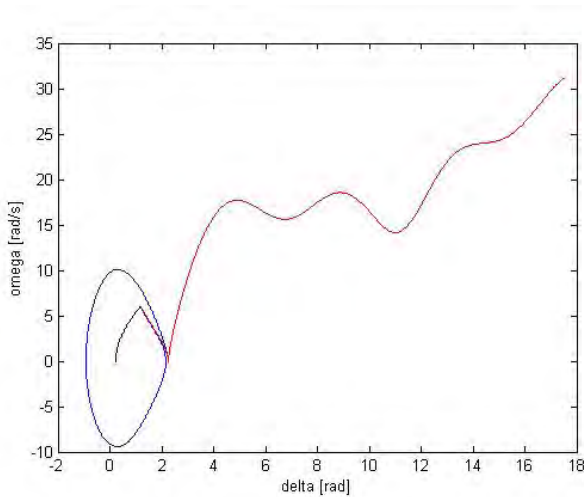


(b)

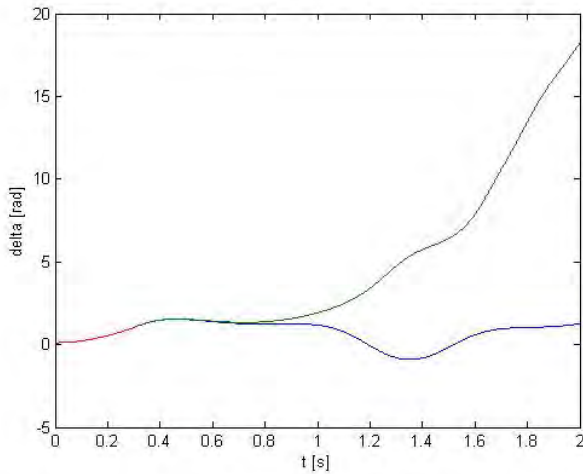
Gambar 4.10. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan D pada sistem 3 generator-9 bus tanpa *damping*

5. Kondisi gangguan pada titik E

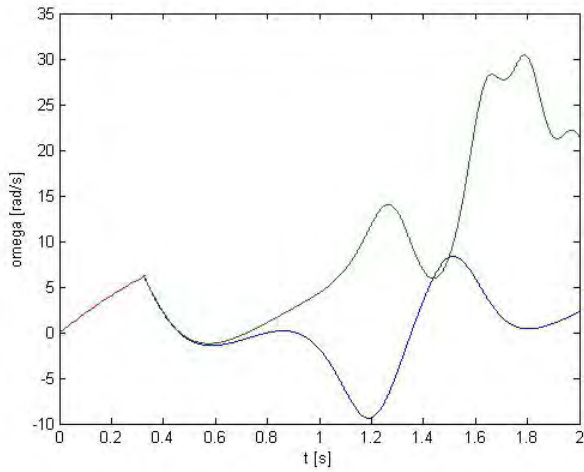
Pada titik gangguan ini terlihat bahwa dengan menggunakan metode *Time Domain Simulation* didapatkan waktu pemutusan kondisi stabil adalah 0,325 sedangkan waktu pemutusan tidak stabil adalah 0,326. Pada grafik menggambarkan bahwa warna merah adalah kondisi tidak stabil sedangkan warna biru adalah kondisi stabil.



Gambar 4.11. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan E pada sistem 3 generator-9 bus tanpa menggunakan *damping*



(a)

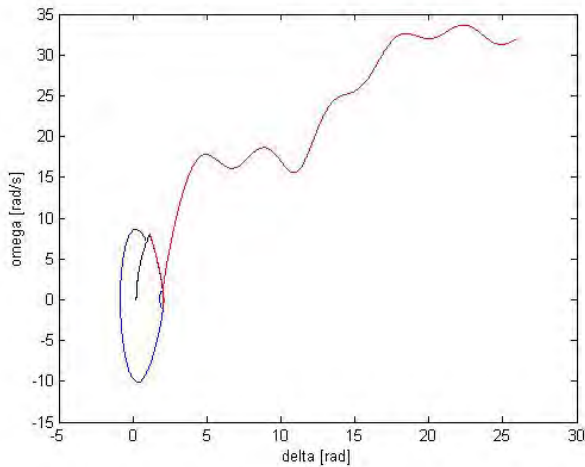


(b)

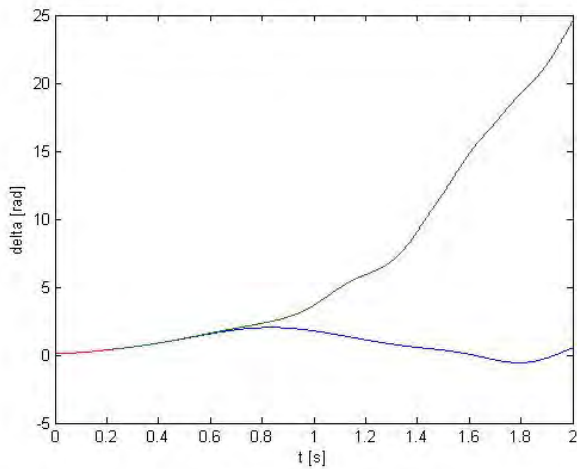
Gambar 4.12. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan E pada sistem 3 generator-9 bus tanpa *damping*

6. Kondisi gangguan pada titik F

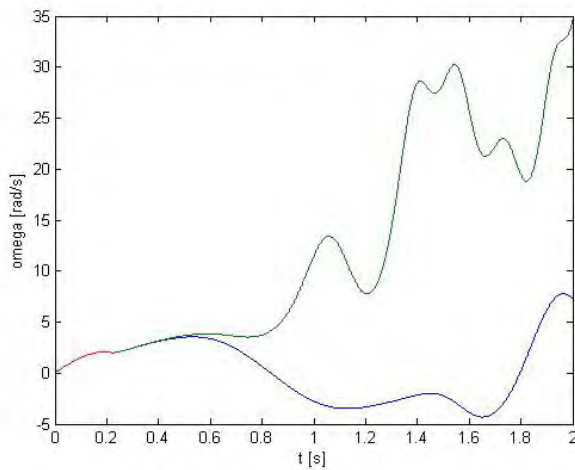
Pada titik gangguan ini terlihat bahwa dengan menggunakan metode *Time Domain Simulation* didapatkan waktu pemutusan kondisi stabil adalah 0,225 sedangkan waktu pemutusan tidak stabil adalah 0,226. Pada grafik menggambarkan bahwa warna merah adalah kondisi tidak stabil sedangkan warna biru adalah kondisi stabil..



Gambar 4.13. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan F pada sistem 3 generator-9 bus tanpa menggunakan *damping*



(a)

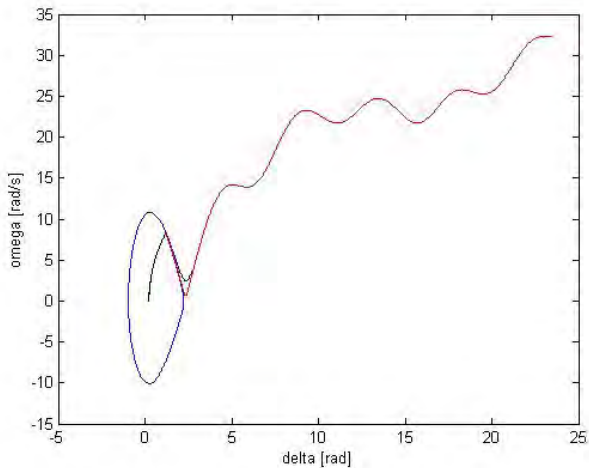


(b)

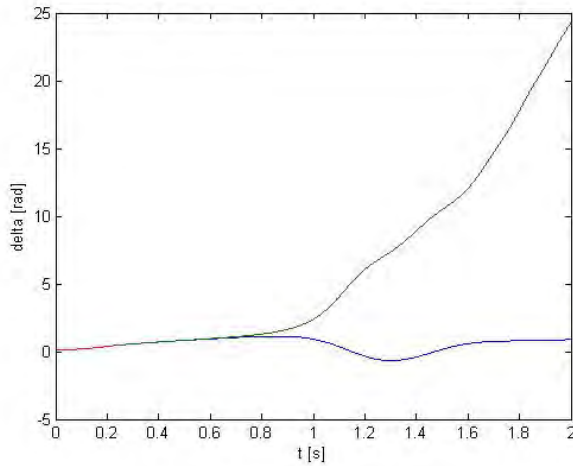
Gambar 4.14. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan F pada sistem 3 generator-9 bus tanpa *damping*

7. Kondisi gangguan pada titik G

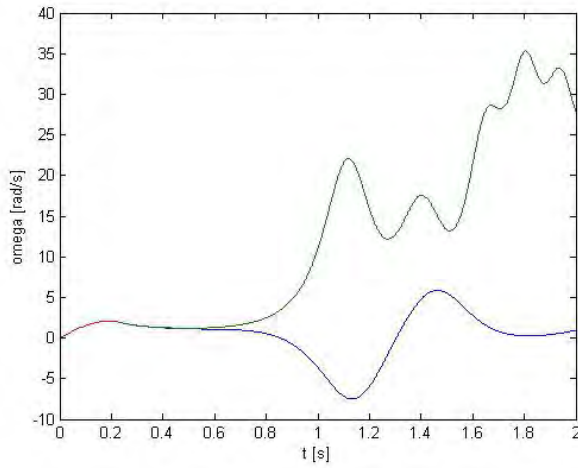
Pada titik gangguan ini terlihat bahwa dengan menggunakan metode *Time Domain Simulation* didapatkan waktu pemutusan kondisi stabil adalah 0,232 sedangkan waktu pemutusan tidak stabil adalah 0,233. Pada grafik menggambarkan bahwa warna merah adalah kondisi tidak stabil sedangkan warna biru adalah kondisi stabil.



Gambar 4.15. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan G pada sistem 3 generator-9 bus tanpa menggunakan *damping*



(a)

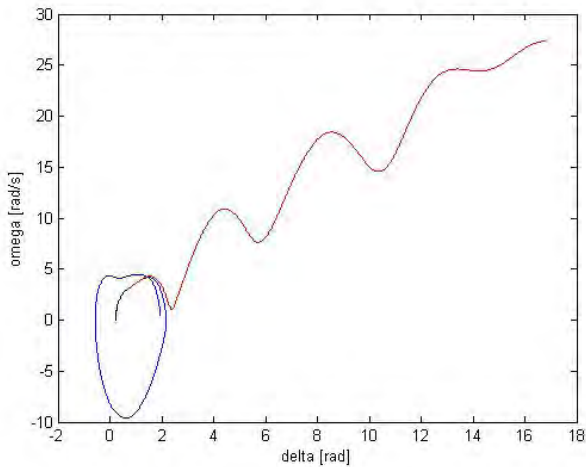


(b)

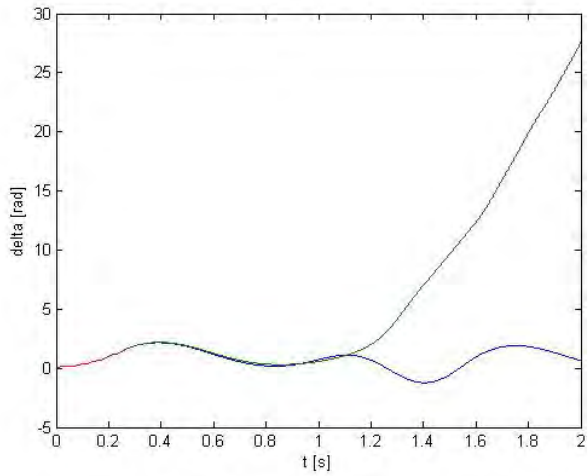
Gambar 4.16. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan G pada sistem 3 generator-9 bus tanpa *damping*

8. Kondisi gangguan pada titik H

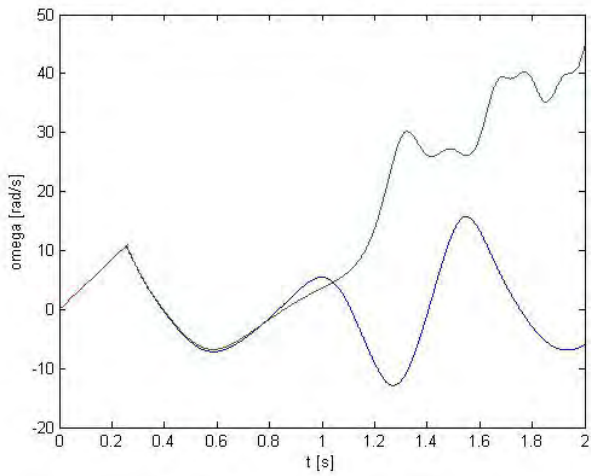
Pada titik gangguan ini terlihat bahwa dengan menggunakan metode *Time Domain Simulation* didapatkan waktu pemutusan kondisi stabil adalah 0,255 sedangkan waktu pemutusan tidak stabil adalah 0,256. Pada grafik menggambarkan bahwa warna merah adalah kondisi tidak stabil sedangkan warna biru adalah kondisi stabil.



Gambar 4.17. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan H pada sistem 3 generator-9 bus tanpa menggunakan *damping*



(a)

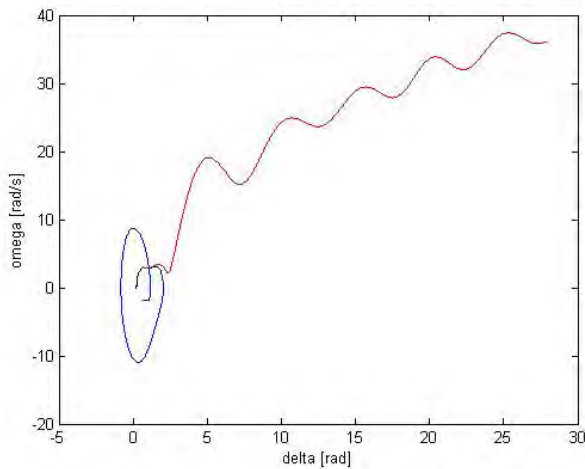


(b)

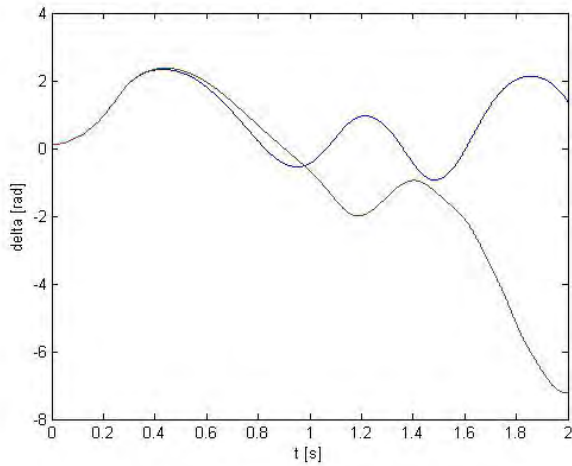
Gambar 4.18. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan H pada sistem 3 generator-9 bus tanpa *damping*

9. Kondisi gangguan pada titik I

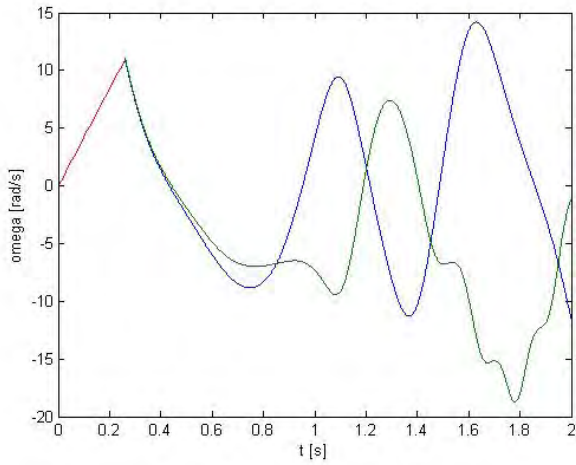
Pada titik gangguan ini terlihat bahwa dengan menggunakan metode *Time Domain Simulation* didapatkan waktu pemutusan kondisi stabil adalah 0,260 sedangkan waktu pemutusan tidak stabil adalah 0,261. Pada grafik menggambarkan bahwa warna merah adalah kondisi tidak stabil sedangkan warna biru adalah kondisi stabil.



Gambar 4.19. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan I pada sistem 3 generator-9 bus tanpa menggunakan *damping*



(a)



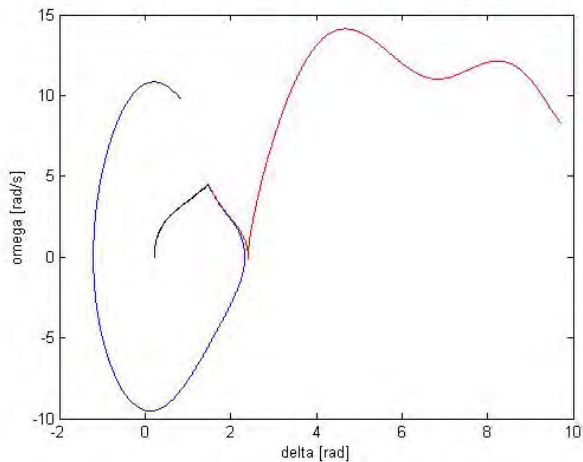
(b)

Gambar 4.20. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan D pada sistem 3 generator-9 bus tanpa *damping*

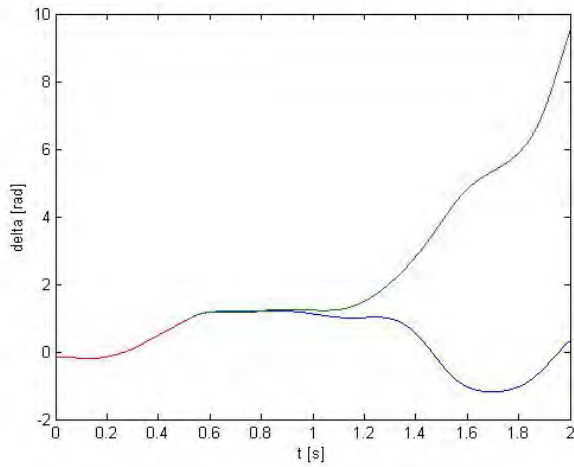
Analisa kestabilan transien pada sistem 4 generator 9 bus tanpa menggunakan damping

1. Kondisi gangguan pada titik A

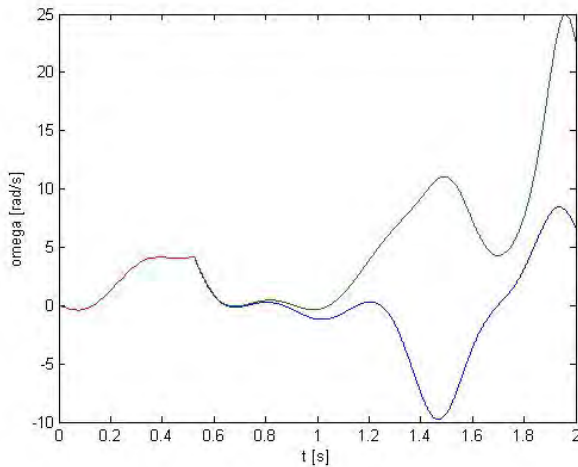
Pada titik gangguan ini terlihat bahwa dengan menggunakan metode *Time Domain Simulation* didapatkan waktu pemutusan kondisi stabil adalah 0,523 sedangkan waktu pemutusan tidak stabil adalah 0,524. Pada grafik menggambarkan bahwa warna merah adalah kondisi tidak stabil sedangkan warna biru adalah kondisi stabil.



Gambar 4.21. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan C pada sistem 4 generator-9 bus tanpa menggunakan *damping*



(a)

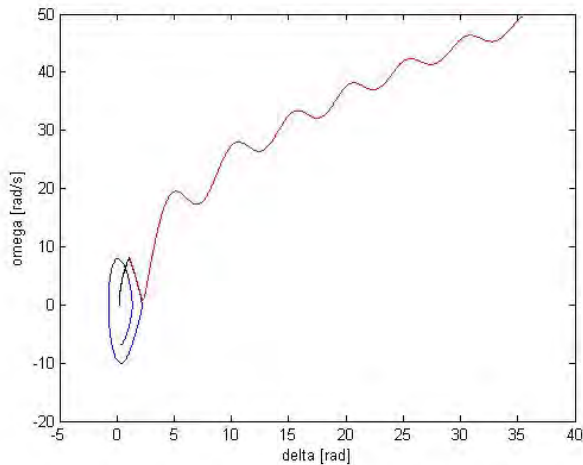


(b)

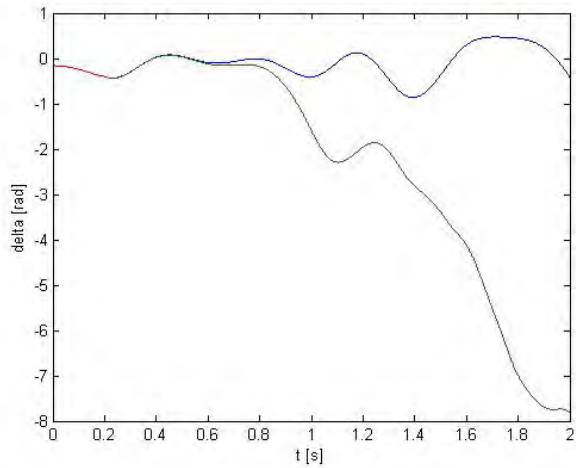
Gambar 4.22. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan C pada sistem 4 generator-9 bus tanpa *damping*

2. Kondisi gangguan pada titik B

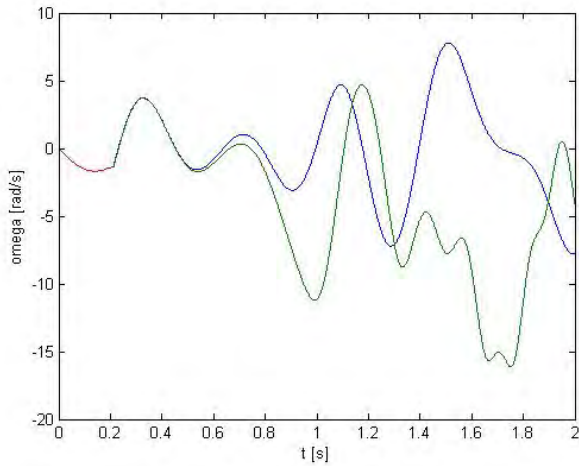
Pada titik gangguan ini terlihat bahwa dengan menggunakan metode *Time Domain Simulation* didapatkan waktu pemutusan kondisi stabil adalah 0,212 sedangkan waktu pemutusan tidak stabil adalah 0,213. Pada grafik menggambarkan bahwa warna merah adalah kondisi tidak stabil sedangkan warna biru adalah kondisi stabil.



Gambar 4.23. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan C pada sistem 4 generator-9 bus tanpa menggunakan *damping*



(a)

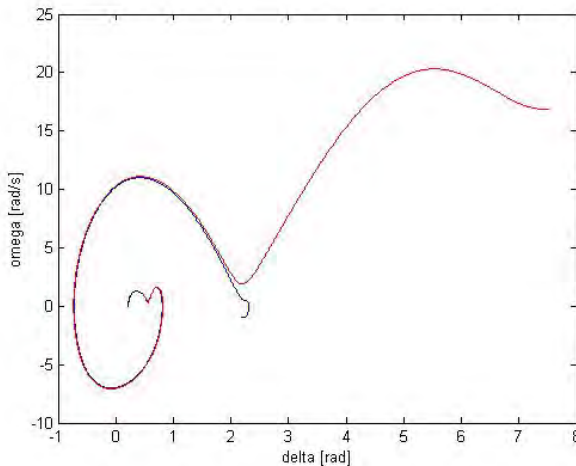


(b)

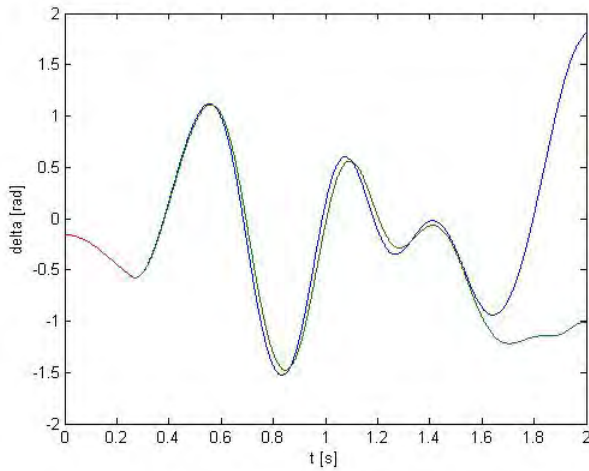
Gambar 4.24. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan C pada sistem 4 generator-9 bus tanpa *damping*

3. Kondisi gangguan pada titik C

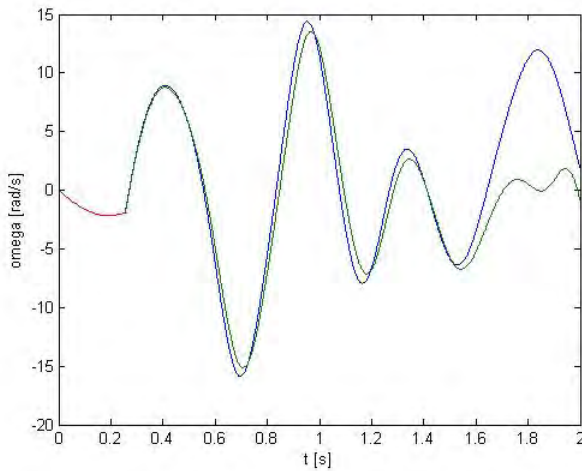
Pada titik gangguan ini terlihat bahwa dengan menggunakan metode *Time Domain Simulation* didapatkan waktu pemutusan kondisi stabil adalah 0,255 sedangkan waktu pemutusan tidak stabil adalah 0,256. Pada grafik menggambarkan bahwa warna merah adalah kondisi tidak stabil sedangkan warna biru adalah kondisi stabil.



Gambar 4.25. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan C pada sistem 4 generator-9 bus tanpa menggunakan *damping*



(a)

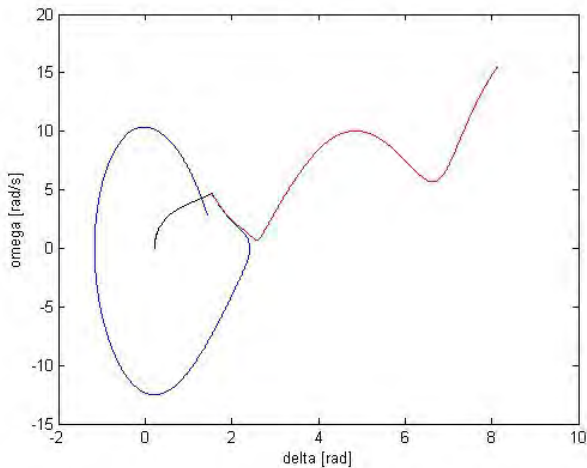


(b)

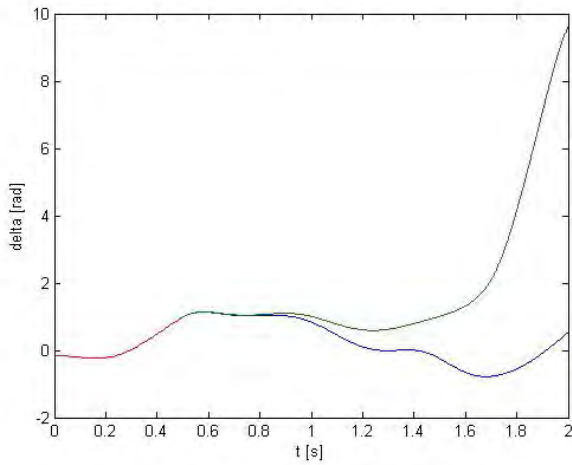
Gambar 4.26. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan C pada sistem 4 generator-9 bus tanpa *damping*

4. Kondisi gangguan pada titik D

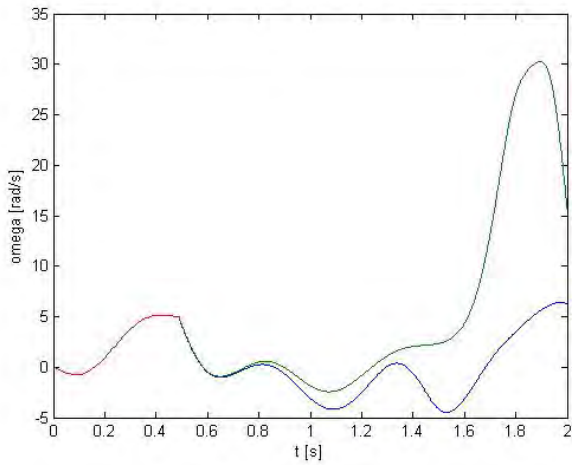
Pada titik gangguan ini terlihat bahwa dengan menggunakan metode *Time Domain Simulation* didapatkan waktu pemutusan kondisi stabil adalah 0,487 sedangkan waktu pemutusan tidak stabil adalah 0,488. Pada grafik menggambarkan bahwa warna merah adalah kondisi tidak stabil sedangkan warna biru adalah kondisi stabil.



Gambar 4.27. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan D pada 62sistem 4 generator-9 bus tanpa menggunakan *damping*



(a)

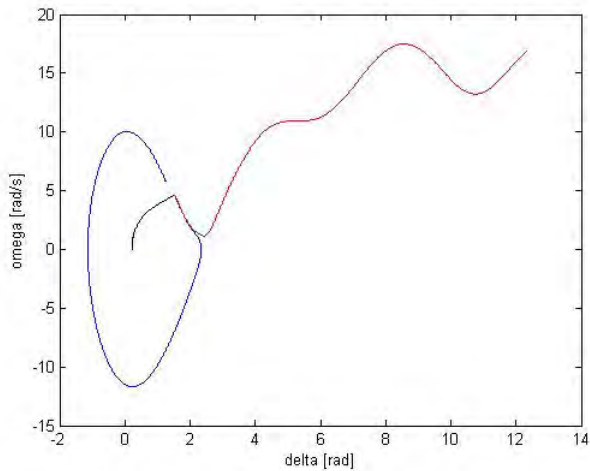


(b)

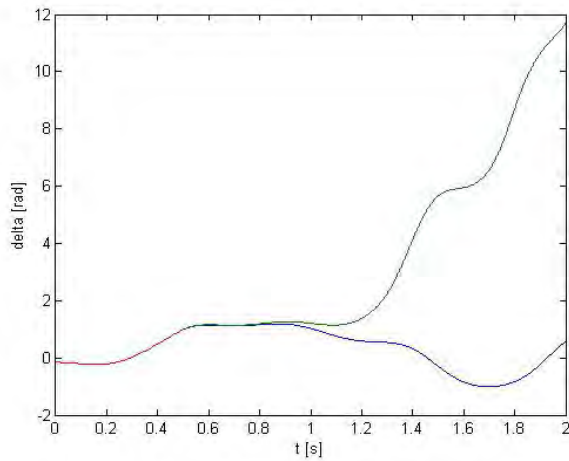
Gambar 4.28. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan D pada sistem 4 generator-9 bus tanpa *damping*

5. Kondisi gangguan pada titik E

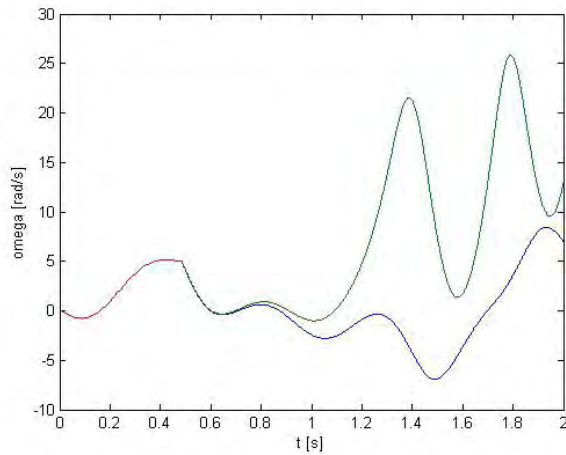
Pada titik gangguan ini terlihat bahwa dengan menggunakan metode *Time Domain Simulation* didapatkan waktu pemutusan kondisi stabil adalah 0,484 sedangkan waktu pemutusan tidak stabil adalah 0,485. Pada grafik menggambarkan bahwa warna merah adalah kondisi tidak stabil sedangkan warna biru adalah kondisi stabil.



Gambar 4.29. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan E pada 64sistem 4 generator-9 bus tanpa menggunakan *damping*



(a)

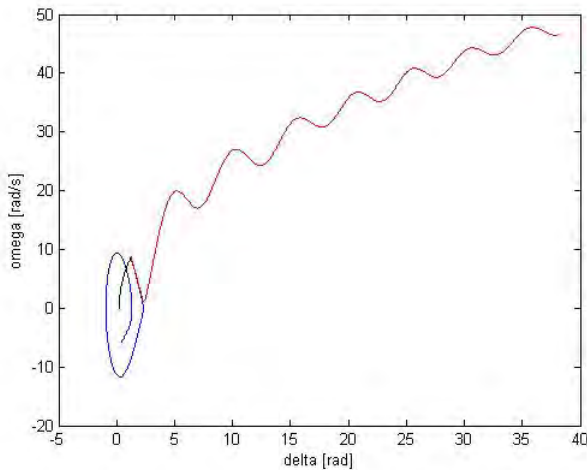


(b)

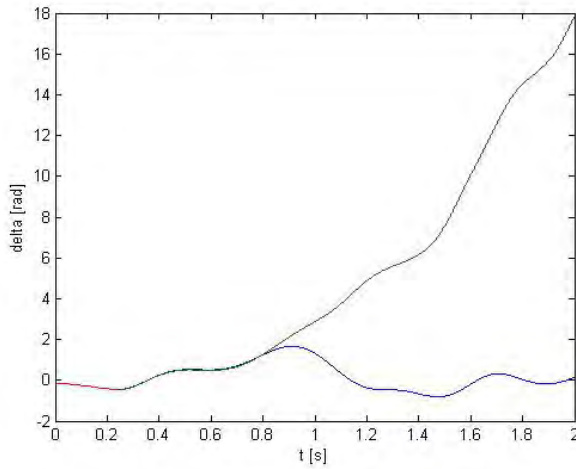
Gambar 4.30. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan E pada sistem 4 generator-9 bus tanpa *damping*

6. Kondisi gangguan pada titik F

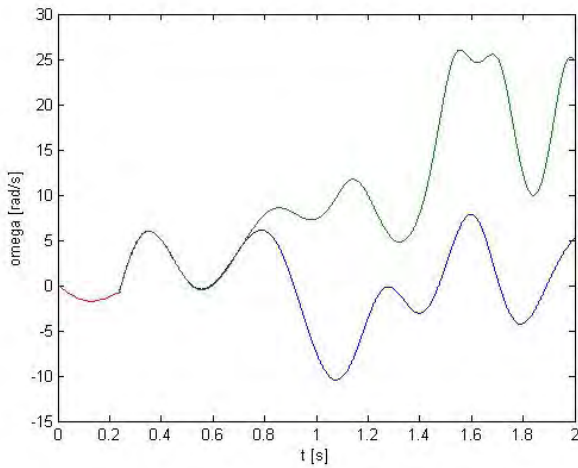
Pada titik gangguan ini terlihat bahwa dengan menggunakan metode *Time Domain Simulation* didapatkan waktu pemutusan kondisi stabil adalah 0,236 sedangkan waktu pemutusan tidak stabil adalah 0,237. Pada grafik menggambarkan bahwa warna merah adalah kondisi tidak stabil sedangkan warna biru adalah kondisi stabil.



Gambar 4.31. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan F pada 66sistem 4 generator-9 bus tanpa menggunakan *damping*



(a)

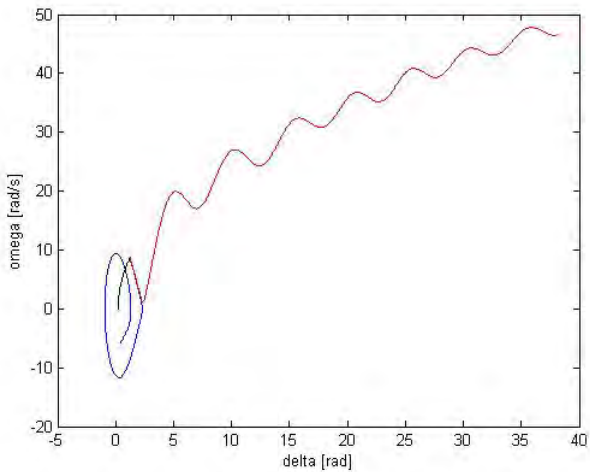


(b)

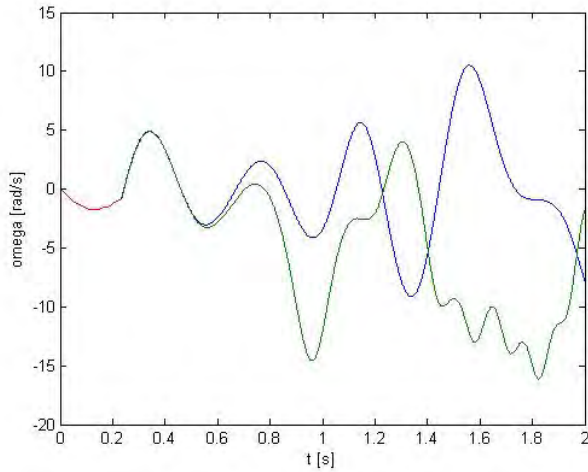
Gambar 4.32. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan F pada sistem 4 generator-9 bus tanpa *damping*

7. Kondisi gangguan pada titik G

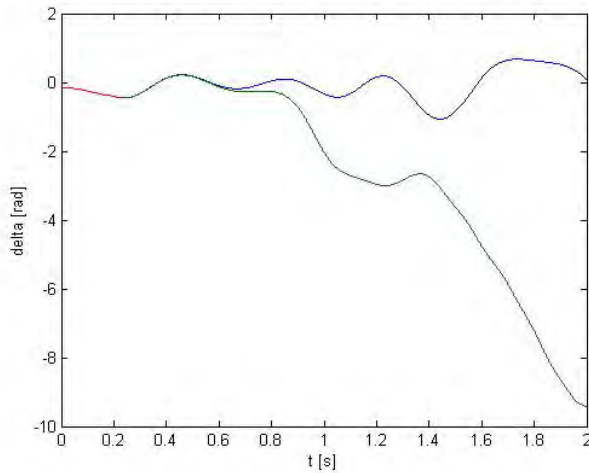
Pada titik gangguan ini terlihat bahwa dengan menggunakan metode *Time Domain Simulation* didapatkan waktu pemutusan kondisi stabil adalah 0,233 sedangkan waktu pemutusan tidak stabil adalah 0,234. Pada grafik menggambarkan bahwa warna merah adalah kondisi tidak stabil sedangkan warna biru adalah kondisi stabil.



Gambar 4.33. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan G pada sistem 4 generator-9 bus tanpa menggunakan *damping*



(a)

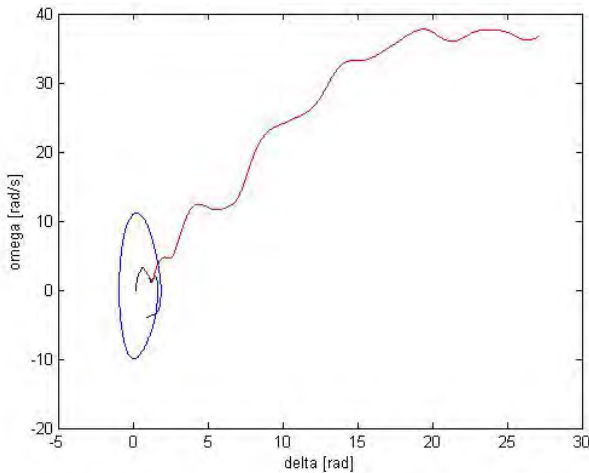


(b)

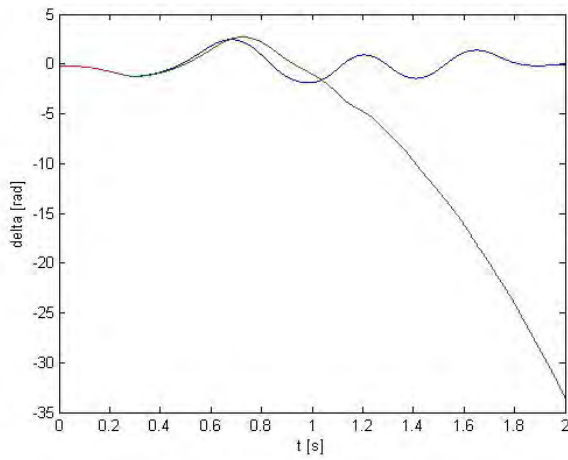
Gambar 4.34. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan G pada sistem 4 generator-9 bus tanpa *damping*

8. Kondisi gangguan pada titik H

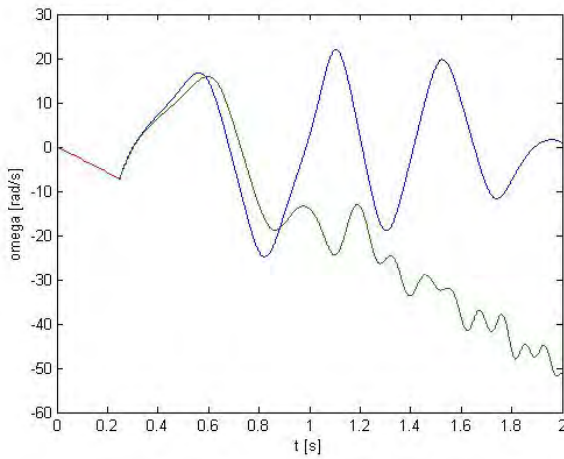
Pada titik gangguan ini terlihat bahwa dengan menggunakan metode *Time Domain Simulation* didapatkan waktu pemutusan kondisi stabil adalah 0,248 sedangkan waktu pemutusan tidak stabil adalah 0,249. Pada grafik menggambarkan bahwa warna merah adalah kondisi tidak stabil sedangkan warna biru adalah kondisi stabil.



Gambar 4.35. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan H pada sistem 4 generator-9 bus tanpa menggunakan *damping*



(a)

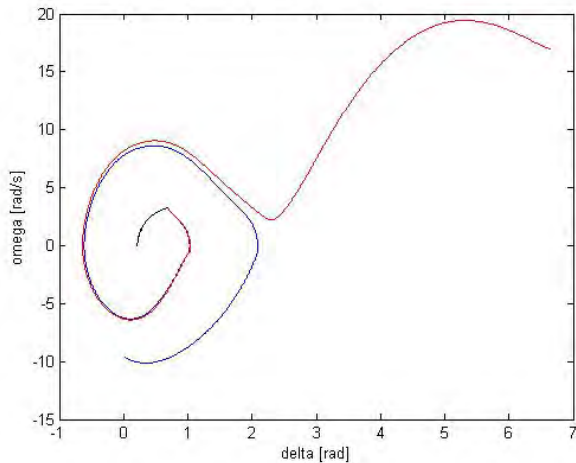


(b)

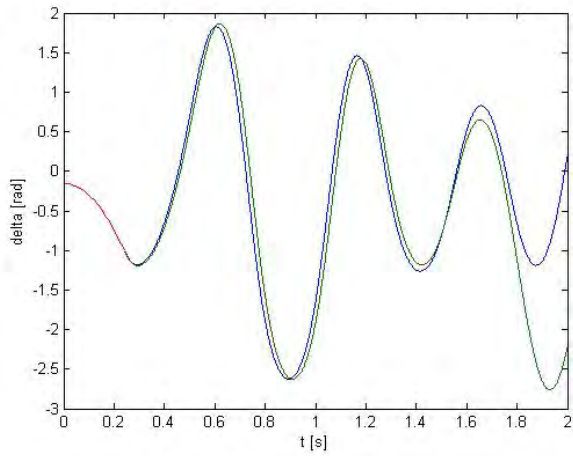
Gambar 4.36. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan H pada sistem 4 generator-9 bus tanpa *damping*

9. Kondisi gangguan pada titik I

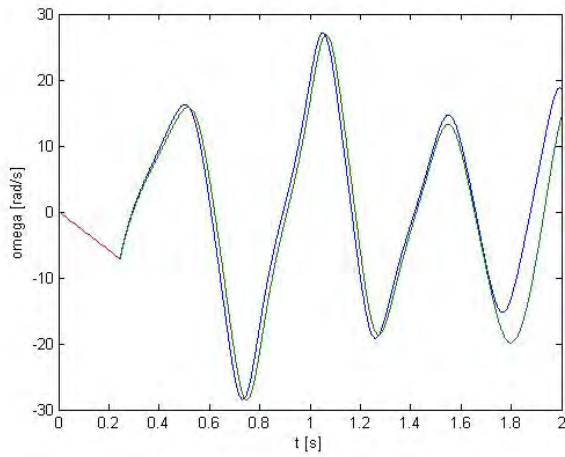
Pada titik gangguan ini terlihat bahwa dengan menggunakan metode *Time Domain Simulation* didapatkan waktu pemutusan kondisi stabil adalah 0,244 sedangkan waktu pemutusan tidak stabil adalah 0,245. Pada grafik menggambarkan bahwa warna merah adalah kondisi tidak stabil sedangkan warna biru adalah kondisi stabil.



Gambar 4.37. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan I pada sistem 4 bus tanpa menggunakan *damping*



(a)



(b)

Gambar 4.38. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan I pada sistem 4 generator-9 bus tanpa *damping*

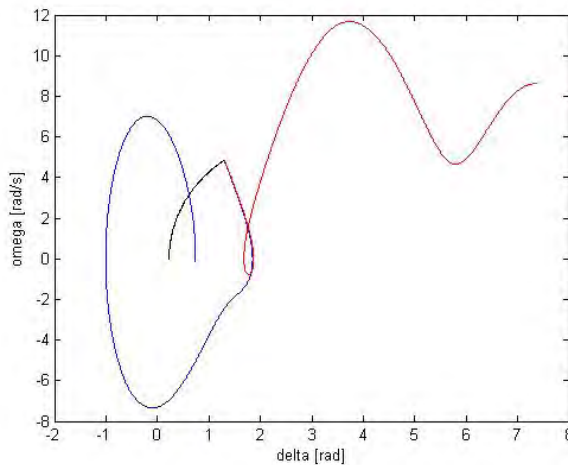
Tabel 4.11. Hasil Perhitungan CCT Tanpa Damping

Tanpa Damping		
Titik Gangguan	CCT	
	Statik	Motor
A	0,342-0,343	0,523-0,524
B	0,213-0,214	0,212-0,213
C	0,259-0,260	0,255-0,256
D	0,326-0,327	0,487-0,488
E	0,325-0,326	0,484-0,485
F	0,225-0,226	0,236-0,237
G	0,232-0,233	0,233-0,234
H	0,255-0,256	0,248-0,249
I	0,260-0,261	0,244-0,245

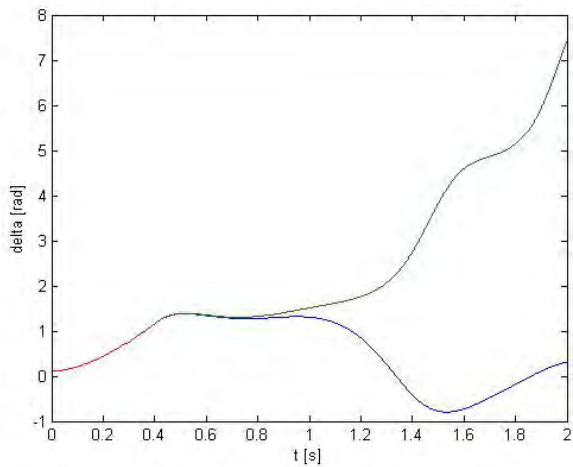
Analisa kestabilan transien pada sistem 3 generator 9 bus dengan menggunakan damping.

1. Kondisi gangguan pada titik A

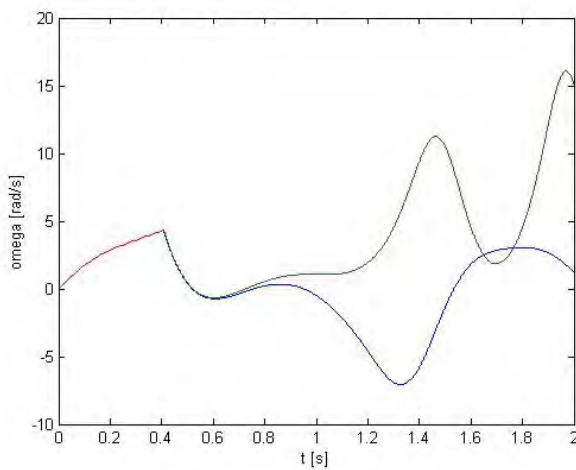
Pada titik gangguan ini terlihat bahwa dengan menggunakan metode *Time Domain Simulation* didapatkan waktu pemutusan kondisi stabil adalah 0,334 sedangkan waktu pemutusan tidak stabil adalah 0,335. Pada grafik menggambarkan bahwa warna merah adalah kondisi tidak stabil sedangkan warna biru adalah kondisi stabil.



Gambar 4.39. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan A pada sistem 3 generator-9 bus dengan menggunakan *damping*



(a)

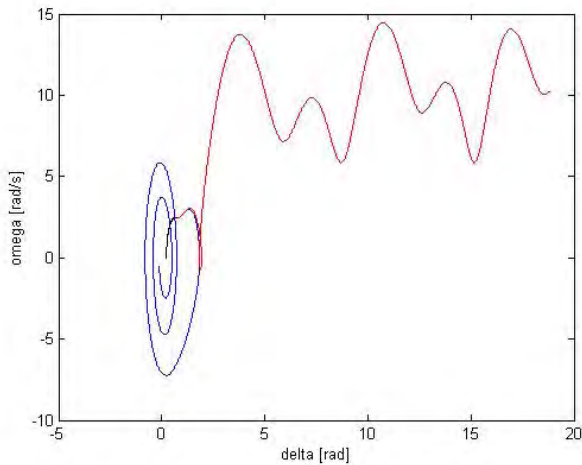


(b)

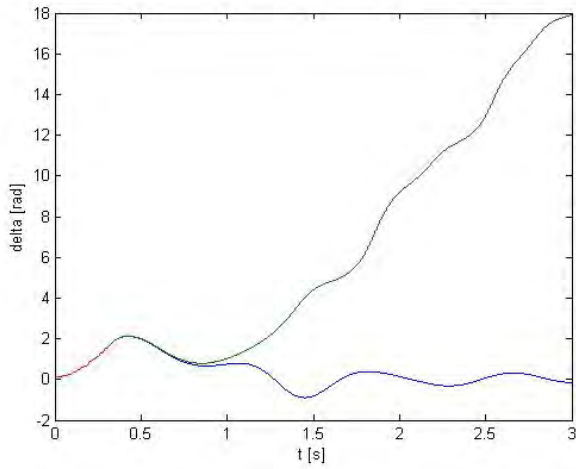
Gambar 4.40. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan A pada sistem 3 generator-9 bus dengan *damping*

2. Kondisi gangguan pada titik H

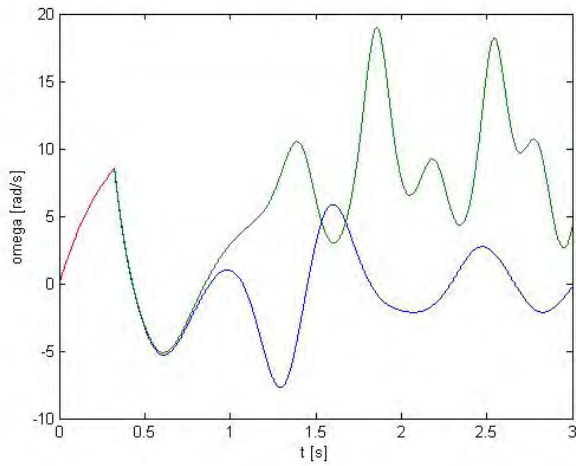
Pada titik gangguan ini terlihat bahwa dengan menggunakan metode *Time Domain Simulation* didapatkan waktu pemutusan kondisi stabil adalah 0,255 sedangkan waktu pemutusan tidak stabil adalah 0,256. Pada grafik menggambarkan bahwa warna merah adalah kondisi tidak stabil sedangkan warna biru adalah kondisi stabil..



Gambar 4.41. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan H pada sistem 3 generator-9 bus dengan menggunakan *damping*



(a)



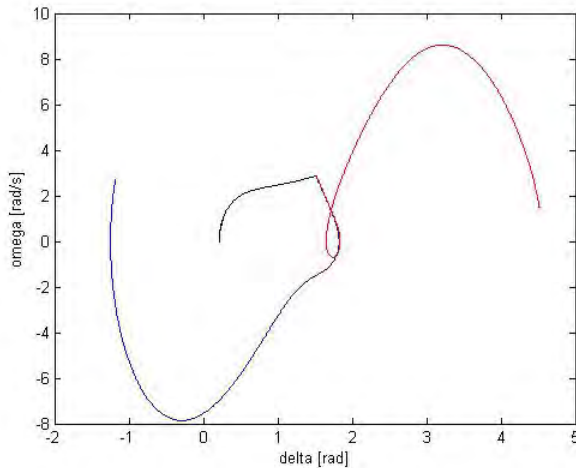
(b)

Gambar 4.42. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan I pada sistem 3 generator-9 bus dengan *damping*

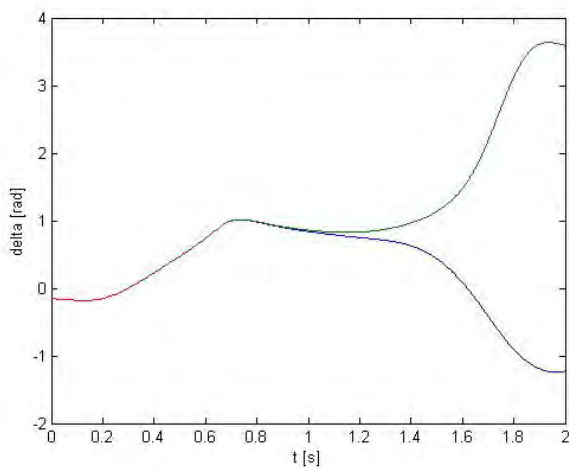
Analisa kestabilan transien pada sistem 4 generator 9 bus dengan menggunakan damping.

1. Kondisi gangguan pada titik A

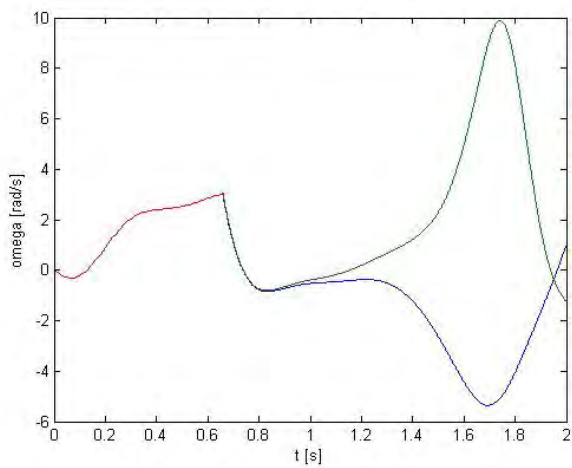
Pada titik gangguan ini terlihat bahwa dengan menggunakan metode *Time Domain Simulation* didapatkan waktu pemutusan kondisi stabil adalah 0,658 sedangkan waktu pemutusan tidak stabil adalah 0,659. Pada grafik menggambarkan bahwa warna merah adalah kondisi tidak stabil sedangkan warna biru adalah kondisi stabil.



Gambar 4.43. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan A pada 79 sistem 4 generator-9 bus dengan menggunakan *damping*



(a)

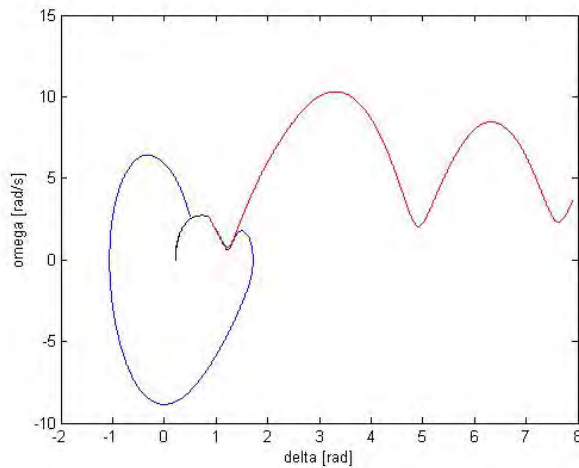


(b)

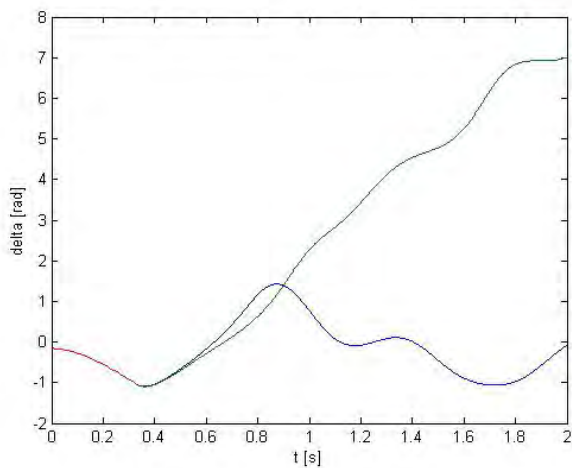
Gambar 4.44. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan A pada sistem 4 generator-9 bus dengan *damping*

2. Kondisi gangguan pada titik H

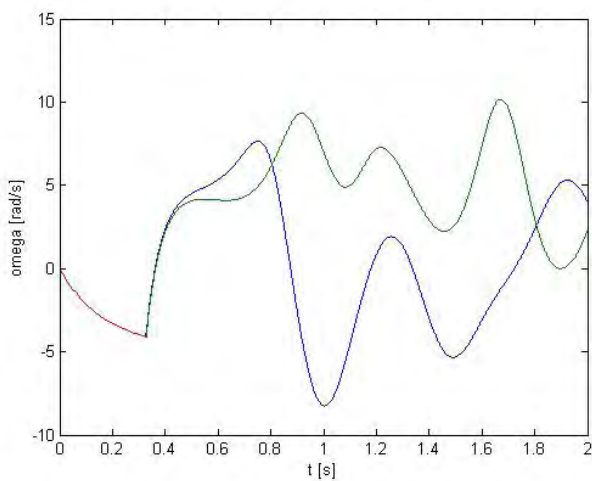
Pada titik gangguan ini terlihat bahwa dengan menggunakan metode *Time Domain Simulation* didapatkan waktu pemutusan kondisi stabil adalah 0,326 sedangkan waktu pemutusan tidak stabil adalah 0,327. Pada grafik menggambarkan bahwa warna merah adalah kondisi tidak stabil sedangkan warna biru adalah kondisi stabil.



Gambar 4.45. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan H pada 81 sistem 4 generator-9 bus dengan menggunakan *damping*



(a)



(b)

Gambar 4.46. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan H pada sistem 3 generator-9 bus dengan *damping*

Tabel 4.12. Hasil Perhitungan CCT dengan Menggunakan Damping

Damping		
Titik Gangguan	CCT	
	Statik	Motor
A	0,407-0,408	0,658-0,659
B	0,243-0,244	0,242-0,243
C	0,332-0,333	0,333-0,334
D	0,385-0,386	0,601-0,602
E	0,383-0,384	0,595-0,596
F	0,259-0,260	0,268-0,269
G	0,263-0,264	0,263-0,264
H	0,322-0,323	0,326-0,327
I	0,327-0,328	0,337-0,338

Berdasarkan hasil simulasi, sistem 4 generator 9 bus didapatkan bahwa adanya damping dapat memperkecil perubahan dari sudut rotor pada setiap kenaikan waktu, sehingga lebih menstabilkan generator. Hal ini ditunjukkan dari lebih lamanya hasil CCT. Selain itu, didapatkan bahwa pada sistem yang menggunakan damping, kecepatan setelah gangguan akan teredam sehingga mempercepat menuju kestabilan.

Nilai CCT menggunakan metode *Time Domain Simulation* berada diantara waktu *Stable Equilibrium Point* (SEP) dan *UnstableEquilibrium Point*. Karena hal tersebut, tidak ditemukan nilai *Controlling Unstable Equilibrium Point* (CUEP), sehingga ada selisih pada nilai CCT dengan metode *Time Domain Simulation*.

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil yang didapatkan dari simulasi dan analisis pada tugas akhir ini, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Metode *Time Domain Simulation* hanya bisa digunakan dengan cara *trial error*. Mencoba dengan mengubah besarnya nilai waktu stabil dengan waktu tidak stabil
2. Nilai CCT semakin besar bila sistem memiliki *damping*, sistem 4 generator 9 bus tanpa menggunakan *damping* titik H 0,248 S - 0,249 S, sedangkan yang menggunakan *damping* titik H 0,326 S – 0,327 S.
3. Sistem tenaga listrik akan semakin stabil bila sistem mempunyai *damping*, dilihat dari semakin lamanya CCT pada sistem yang menggunakan *damping* disbanding dengan sistem yang tidak menggunakan *damping*

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan dalam penerapan metode *Time Domain Simulation* untuk menghitung besarnya *Critical Clearing Time* atau CCT adalah :

1. Penerapan dengan metode lain perlu ditambahkan, agar ada pembandingan dengan metode *Time Domain Simulation*.
2. Untuk pengembangan lebih lanjut dapat dilakukan analisa yang sama sistem 3 Generator 9 Bus.

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

DAFTAR PUSTAKA

- [1] IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, “*Definition and Classification of Power System Stability*,” *IEEE Transaction on Power System*, Vol.19, No.2, May. 2004.
- [2] Grainger, Jhon. J dan William D. Stevenson, JR, *Power System Analysis*. New York: McGraw-Hill, Inc, 1994.
- [3] Qudsi, ony A “Studi Perhitungan *Critical clearing time* Pada Beban Statis Berbasis *Controlling unstable equilibrium point*”, 2012
- [4] Kundur, P, *Power System Stability and Control*. New York: McGraw-Hill, Inc, 1994.
- [5] Saadat, Hadi., “*Power System Analysis*,” Singapura, McGraw-Hill, Inc, 2004, edisi kedua.

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

RIWAYAT PENULIS



Ahmad Subhan lahir pada hari senin tepatnya tanggal 20 April 1992 di Desa Kregen Kecamatan Kraksaan Kabupaten Probolinggo. Penulis merupakan anak ketiga dari tiga bersaudara. Masa-masa pendidikannya, pertama-tama ditempuh di TK Ihyaul Islam Pajarakan kemudian di lanjutkan di SDN Kregen 1. Selanjutnya pendidikan menengah pertamanya, dihabiskan di SMP Negeri 1 Pajarakan kemudian di lanjutkan di SMA Negeri 1 Kraksaan. Setelah lulus dari tingkat menengah atas, tidak disangka dapat melanjutkan ke salah satu Institut Terbesar di

Indonesia yaitu Institut Teknologi Sepuluh Nopember setelah berjuang melalui jalur masuk BIDIKMISI ITS. Di ITS diterima di salah satu jurusan terbesar yaitu jurusan Teknik Elektro yang terletak dalam Fakultas Teknologi Industri.

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----